

# **Qualitätsentwicklung von Buchenvoranbauten (*Fagus sylvatica* L.) nach unplanmäßigem, sturmbedingtem Verlust des Fichtenschirms**

Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades  
**Doctor rerum silvaticarum (Dr. rer. silv.)**

vorgelegt von

**M. Sc. Johannes Weidig**

geboren am 22.07.1986 in Eisenach

Gutachter:

Herr Prof. Dr. habil. Sven Wagner, Technische Universität Dresden

Herr Prof. Dr. habil. Christian Ammer, Georg-August-Universität Göttingen

Herr Prof. Dr. habil. Andreas Roloff, Technische Universität Dresden

Tag der Verteidigung: 25. Mai 2016

## Erklärung des Promovenden

Die Übereinstimmung dieses Exemplars mit dem Original der Dissertation zum Thema:

**„Qualitätsentwicklung von Buchenvoranbauten (*Fagus sylvatica* L.) nach  
unplanmäßigem, sturmbedingtem Verlust des Fichtenschirms“**

wird hiermit bestätigt.

.....

Ort, Datum

.....

Unterschrift des Doktoranden

## **Danksagung**

Diese Dissertation konnte überhaupt nur zustande kommen, weil sich der Staatsbetrieb Sachsenforst sowie die ThüringenForst-A.ö.R. zur Finanzierung des zugehörigen Forschungsprojekts bereit erklärten. Namentlich Herrn Dr. Dirk-Roger Eisenhauer sowie Herrn Wolfgang Arenhövel gilt diesbezüglich großer Dank für ihr Interesse am Thema, die Befürwortung unseres Projekts und das uns entgegengebrachte Vertrauen.

Ein ganz besonderes Dankeschön gebührt meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr. Sven Wagner. Erst durch sein Angebot, in meinem Lieblingsfachgebiet, dem Waldbau, zu promovieren, kam ich überhaupt auf diese Fährte, worüber ich heute sehr glücklich bin. Vor allem aber trug Prof. Wagner durch seine sehr intensive, konstruktive und persönliche Art der Betreuung maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit und zur Überwindung der einen oder anderen Promotionskrise bei. Unter seinen Fittichen fühlte ich mich jederzeit – sowohl wissenschaftlich als auch persönlich – bestens aufgehoben. Vielen herzlichen Dank!

Weiterhin danke ich Frau Dr. Franka Huth für ihre stets ungebrochene Hilfsbereitschaft und die vielen kreativen Ratschläge während meiner Zeit am Waldbaulehrstuhl. Sie war es, die durch ihre exzellente Betreuung früherer Graduierungsarbeiten überhaupt erst mein großes Interesse an der Waldbauwissenschaft weckte.

Herrn Prof. Dr. Christian Ammer sowie Herrn Prof. Dr. Andreas Roloff danke ich für die Bereitschaft zur Übernahme der Gutachten.

Dr. Nico Frischbier und Clemens Weiser gebührt ebenfalls ein herzlicher Dank. Als Schnittstellen zu den Forstbetrieben hatten beide jederzeit ein offenes Ohr für meine Fragen. Sie scheuten keine Mühen, um meinen zahlreichen Wünschen nach Daten zu Versuchsflächen sowie betriebsspezifischen Informationen schnell und unkompliziert nachzukommen. Dank gebührt beiden auch für ihre interessierte und kritische, dabei jedoch stets konstruktive Diskussionskultur und die zahlreichen gewinnbringenden Ratschläge aus waldbaupraktischer Sicht.

Für die Überlassung der Versuchsflächen bin ich den Thüringer Forstämtern Frauenwald, Oberhof und Sonneberg sowie den sächsischen Forstbezirken Bärenfels, Chemnitz und Eibenstock sehr verbunden. Insbesondere den Revierleitern möchte ich für ihre Hilfsbereitschaft und Toleranz gegenüber meinem Wirken in ihren Revieren danken.

## - Danksagung -

---

Für die akribische Unterstützung während der sehr langwierigen und zähen Recherche von Naturalvollzügen und Herkunftsangaben zu den untersuchten Buchenvorantbauten danke ich Dr. Heino Wolf und Sven Martens vom Staatsbetrieb Sachsenforst sowie Herrn Stefan Stiefel und Herrn Ralf Wenzel von der ThüringenForst-A.ö.R.

Dr. Björn Günther von der Professur für Forstnutzung der TU Dresden gebührt Dank für die Bereitstellung der Jahrringmessanlage und die methodische Einführung.

Meinen stets hoch motivierten „Messgehilfen“ Alexandra Wehnert, Sebastian Graf und Fritz Polzin danke ich für ihr Durchhaltevermögen und die gewissenhafte Arbeit. Nicht nur, dass ich ohne ihre Hilfe vermutlich noch heute im tiefen Wald meine Buchen vermessen würde. Durch die vielen netten Gespräche wurde auch so manche anstrengende Messkampagne um einiges erträglicher. Ein ganz besonderer Dank gilt Alexandra Wehnert, welche sich weit über ihre vertraglichen Pflichten hinaus in die Außenaufnahmen einbrachte und selbst bei schlechtestem Wetter derart engagiert und gewissenhaft bei der Sache war, dass man manchmal hätte denken können, es ginge um ihre eigene Dissertation. Vielen Dank dafür!

Ein enorm wichtiger Rückhalt waren meine besten Freunde Tobias Hamm, Daniel Göbel, Andreas Brauer, Frank Dietel, Martin Schubert, Manuel Wächter und Clemens Weiser. Ehrenamtliche Arbeitseinsätze im Wald waren für sie zu jeder Zeit ebenso selbstverständlich wie fachlicher Rat. Für mich persönlich aber waren vor allem die vielen gemeinsamen Momente nach Feierabend und die ermutigenden Worte in Phasen scheinbar unüberwindbarer wissenschaftlicher Sackgassen das Allerwichtigste. Vielen Dank dafür!

Meine liebe Freundin Susi hat durch ihre moralische Unterstützung sowie zahlreiche aufmunternde und motivierende Gespräche so einige Hindernisse aus dem Weg geräumt. Dank ihrer Engelsgeduld und verständnisvollen Art konnten wir stressige Phasen gemeinsam leichter überwinden. Dafür danke ich ihr von ganzem Herzen!

Meiner Familie, allen voran meinen Eltern, gilt ein riesiges Dankeschön für die unentwegte Unterstützung in jeder Lebenslage und das Vertrauen in meine Ziele. Ohne ihre allzeit selbstverständlich erscheinende Hilfe wäre so einiges nicht oder aber nur sehr viel schwerer umsetzbar gewesen.



## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1	Hintergrund der Untersuchung .....	1
1.2	Zielstellung und Arbeitshypothesen .....	5
<b>2</b>	<b>Material und Methoden .....</b>	<b>7</b>
2.1	Untersuchungsgebiet .....	7
2.1.1	Anforderungen an ein Untersuchungsgebiet .....	7
2.1.2	Modellregion „Sächsisches Erzgebirge und Vorland“ .....	8
2.1.2.1	Klima und Standort.....	8
2.1.2.2	Natürliche Vegetation und waldbauliche Ausgangslage .....	9
2.1.3	Modellregion „Thüringer Wald und Hügelland“ .....	11
2.1.3.1	Klima und Standort.....	11
2.1.3.2	Natürliche Vegetation und waldbauliche Ausgangslage .....	12
2.2	Auswahl der Untersuchungsflächen .....	15
2.2.1	Untersuchungsfaktoren.....	15
2.2.2	Grundlagen und Auswahlkriterien .....	16
2.2.3	Datenbankanalyse und Flächenauswahl .....	19
2.2.4	Charakterisierung der Untersuchungsflächen .....	25
2.3	Datenaufnahme .....	31
2.3.1	Etablierung der Versuchsanlage.....	31
2.3.2	Grundlagen der Datenaufnahme.....	35
2.4	Mathematisch-statistische Auswertung .....	37
2.4.1	Grundlagen der statistischen Auswertung.....	37
2.4.2	Verfahrensschritte für lineare gemischte Modelle .....	40
2.4.3	Lineare gemischte Modelle für Longitudinaldaten .....	45
2.4.4	Gemischte Modelle für Poisson- und binomial verteilte Daten .....	47
2.4.5	Modelle für ordinal multinomiale Daten.....	50
2.5	Kurze Zusammenfassung zu Material und Methoden .....	52
<b>3</b>	<b>Wachstum und Zuwachsreaktion .....</b>	<b>54</b>
3.1	Hintergrund und Zielstellung.....	54
3.2	Material und Methoden .....	56
3.2.1	Erhebung der Wachstumsgrößen .....	56

3.2.2	Jahrringanalyse .....	57
3.3	Statistische Auswertung .....	60
3.3.1	Analyse der Zustandsgrößen .....	60
3.3.2	Zeitreihenanalyse für Zuwachsdaten .....	61
3.4	Ergebnisse .....	63
3.4.1	Zustandsgrößen des Baumwachstums .....	63
3.4.2	Reaktion des Längenzuwachses nach Freistellung .....	67
3.4.3	Reaktion des Radialzuwachses nach Freistellung .....	69
3.5	Diskussion .....	72
3.5.1	Methoden zur Analyse der Wachstumsreaktion .....	72
3.5.2	Höhenwachstum .....	74
3.5.3	Durchmesserwachstum .....	79
3.5.4	Effekt des Entwicklungsstadiums .....	83
3.6	Waldbauliche Schlussfolgerung .....	84
3.7	Zusammenfassung .....	85
<b>4</b>	<b>Astigkeit und Astreinigung .....</b>	<b>87</b>
4.1	Hintergrund und Ziele der Untersuchung .....	87
4.2	Material und Methoden .....	89
4.3	Statistische Auswertung .....	90
4.4	Ergebnisse .....	91
4.4.1	Qualitätskriterium Grünäste .....	91
4.4.2	Qualitätskriterium Astreinigung .....	94
4.5	Diskussion .....	97
4.5.1	Schirmverlust, Grünastentwicklung und Qualität .....	97
4.5.2	Schirmverlust und Astreinigung .....	103
4.6	Waldbauliche Schlussfolgerung .....	105
4.7	Zusammenfassung .....	107
<b>5</b>	<b>Kronenmorphologie, Qualität und Häufigkeit von Z-Baum-Anwärtern .....</b>	<b>109</b>
5.1	Hintergrund und Zielstellung .....	109
5.2	Material und Methoden .....	111
5.2.1	Erhebung von Steilästen und Zwieseln .....	111
5.2.2	Gutachterliche Qualitätsansprache .....	112
5.3	Statistische Auswertung .....	113

5.3.1	Analyse von Zähl- und Proportionaldaten .....	113
5.3.2	Analyse der Qualitätsklassenverteilung .....	115
5.3.3	Metrische Charakterisierung der Qualitätsklassen .....	116
5.4	Ergebnisse.....	117
5.4.1	Steiläste und Zwiesel.....	117
5.4.2	Qualitätsklassen.....	120
5.4.3	Charakterisierung der Qualitätsklassen.....	121
5.4.4	Häufigkeit von Z-Baum-Anwärtern .....	125
5.5	Diskussion .....	126
5.5.1	Steilast- und Zwieselbildung.....	126
5.5.2	Qualitative Gesamteinschätzung .....	132
5.5.3	Charakterisierung der Qualitätsklassen.....	133
5.5.4	Häufigkeit von Z-Baum-Anwärtern .....	135
5.6	Waldbauliche Schlussfolgerung .....	138
5.7	Zusammenfassung .....	140
<b>6</b>	<b>Zusammenführende Diskussion.....</b>	<b>142</b>
6.1	Methodendiskussion .....	142
6.1.1	Repräsentativität und Vergleichbarkeit der Versuchsflächen .....	142
6.1.2	Herkunft des Pflanzenmaterials.....	145
6.1.3	Rasterbasiertes Probekreisverfahren .....	148
6.1.4	Erhebung der Pflanzendichte im Voranbau.....	152
6.2	Gesamthafte Interpretation der Ergebnisse.....	154
6.2.1	Plastizität der Buche und Folgen für die Qualität .....	154
6.2.2	Funktions- oder Nachhaltumbau?.....	161
<b>7</b>	<b>Schlussfolgerung und Handlungsempfehlungen .....</b>	<b>170</b>
<b>8</b>	<b>Ausblick.....</b>	<b>177</b>
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>179</b>
<b>10</b>	<b>Summary .....</b>	<b>183</b>
<b>11</b>	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>187</b>
<b>12</b>	<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>191</b>
<b>13</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>194</b>

## Abkürzungsverzeichnis

AIC	AKAIKE-Informationskriterium
B°	Bestockungsgrad
DSW(2)	Datenspeicher Wald (Version 2)
G [m <sup>2</sup> /ha]	Bestandesgrundfläche in m <sup>2</sup> /ha
GLM	Generalized Linear Model (generalisiertes lineares Modell)
GLMM	Generalized Linear Mixed Model (generalisiertes lineares gemischtes Modell)
Hf(f)	Klimastufe der höheren Berglagen mit (sehr) feuchtem Klima
k. A.	keine Angabe
KWB	klimatische Wasserbilanz
LMM	Linear Mixed Model (lineares gemischtes Modell)
ln	natürlicher Logarithmus (Basis e)
Mf(f)	Klimastufe der mittleren Berglagen mit (sehr) feuchtem Klima
pnV	potenzielle natürliche Vegetation
POLR	Proportional Odds Logistic Regression
PQL	Penalized Quasi-Likelihood
RBU	Rotbuche ( <i>Fagus sylvatica</i> L.)
SD	Standardabweichung
TWB	Teilwuchsbezirk
Uf(f)	Klimastufe der unteren Berglagen mit (sehr) feuchtem Klima
Vf(f)	Klimastufe des Hügellandes mit (sehr) feuchtem Klima
VZ-Länge	Vegetationszeitlänge
WIS	Waldinformationssystem Sachsen

# **1 Einleitung**

## **1.1 Hintergrund der Untersuchung**

Seit mittlerweile mehr als zwei Jahrzehnten forcieren die deutschen Forstbetriebe den Waldumbau instabiler und durch funktionale Risiken belasteter Fichtenforste zu naturnäheren, standortangepassten Mischwäldern (vgl. OTTO 1995; ARENHÖVEL 1996; HERING ET AL. 1999; BUTTER 2001; EISENHAUER 2008). Massive und in immer höherer Frequenz wiederkehrende Großschadensereignisse lösten zum damaligen Zeitpunkt ein Umdenken aus, welches nach FLEDER (1990) durch zwei wesentliche waldbauliche Grundsatzüberlegungen gekennzeichnet war: die Hinwendung zum naturnahen Waldbau und das betonte Streben nach mehr Qualität auf der Flächeneinheit. Im Zuge dessen riefen auch die ehemaligen Landesforstverwaltungen der Freistaaten Thüringen und Sachsen Anfang der 1990er-Jahre großflächig angelegte Waldumbauprogramme ins Leben (vgl. ARENHÖVEL 1996; LAF 1996; HERING ET AL. 1999; ECKARDT & ARENHÖVEL 2006). Namentlich in den Mittelgebirgen sowie deren vorgelagerten Hügellandbereichen wird das Waldbild aus kulturhistorischen Gründen von einschichtigen, gleichaltrigen Fichtenreinbeständen geprägt. Dort ist der Gegensatz zwischen realer und potenziell natürlicher Baumartenzusammensetzung am größten, sodass diese Gebiete den Schwerpunkt des Waldumbaus bilden (WAGNER & HENKEL 1993; EISENHAUER & SONNEMANN 2009). Konkret ist allein im Thüringer Wald eine Fläche von bis zu 25.000 ha umzubauen (WAGNER & HENKEL 1993; ECKARDT & ARENHÖVEL 2006). Neuere Analysen gehen sogar von einer potenziellen Umbaufläche von 44.000 ha im gesamten Staatswald Thüringens aus. Davon erfordern 18.000 ha aktive Maßnahmen (OSWALD 2012). Die Thüringer Landesregierung bekannte sich deshalb bereits 1993 mit dem „Ökoprogramm Wald“ zur Notwendigkeit eines aktiven Waldumbaus. Im Koalitionsvertrag des Jahres 2009 wird die betreffende Waldfläche auf nicht weniger als 100.000 ha beziffert (THÜRINGER LANDESREGIERUNG 2009). Noch ein wenig ambitionierter sind die in der „Waldstrategie 2050 für den Freistaat Sachsen“ festgeschriebenen Bestrebungen. Ihnen zufolge ist es das politisch erklärte Ziel, den Waldumbau auf kritischen Standorten bis 2050 abzuschließen. In Summe betrifft dies allein im Staatswald insgesamt 80.000 ha (SMUL 2013).

Als Leitbild für die Umgestaltung der Baumartenzusammensetzung wird die potenzielle natürliche Vegetation (pnV) herangezogen. Darauf basierend wurden, unter Berücksichtigung bereits eingetretener sowie prognostizierter Klimaveränderungen (vgl. GEMBALLA & SCHLUTOW 2007), zukünftige Leitwaldgesellschaften Sachsens hergeleitet (SCHLUTOW &

GEMBALLA 2008). Sie bildeten die Grundlage der Ausweisung von Zielzuständen der Waldentwicklung und damit der Baumartenwahl beim Waldumbau im Landeswald (SACHSENFORST 2013b). Die standortspezifische Zuordnung der Zielzustände offenbart unmissverständlich die Richtung der anzustrebenden Baumartenveränderung: Über 40 % der Landeswaldfläche Sachsens sollen demnach langfristig Bestockungen mit führender Buche tragen (SACHSENFORST 2013c). Daneben tritt die Buche als wirtschaftlich relevante Mischbaumart in weiteren Zielzuständen auf. In einem ähnlichen Verfahren wurden – ausgehend von der forstlichen Standortkartierung sowie einer neu erarbeiteten, an den Klimawandel angepassten und dynamischen Klimagliederung – entsprechende Bestandeszieltypen als Wegweiser für den Waldumbau in Thüringen entwickelt (vgl. FRISCHBIER ET AL. 2010; TLWJF 2011). Auch hier fällt der besondere Stellenwert der Buche ins Auge: Auf etwa 65 % der Thüringer Waldfläche können auch mit Blick auf den voranschreitenden Klimawandel Bestandeszieltypen mit Buche als Hauptbaumart gewählt werden (FRISCHBIER ET AL. 2010).

Vorrangiges Bestreben sämtlicher Waldumbaumaßnahmen ist deshalb die Erhöhung des Laubholzanteils, speziell der Rotbuche (*Fagus sylvatica* L.). Aufgrund ihrer prägenden Rolle in den natürlichen Waldgesellschaften der Mittelgebirge und insbesondere vor dem Hintergrund des Klimawandels kommt ihr ein hoher Stellwert zu (IRRGANG 2002; BAUMGARTEN & TEUFFEL 2005; KÖLLING ET AL. 2005; ECKARDT & ARENHÖVEL 2006; ARENHÖVEL 2007; FRISCHBIER ET AL. 2010). Ihr Flächenanteil soll im Landeswald Thüringens langfristig von derzeit 21 % auf 27 % ansteigen (ARENHÖVEL 2007; KOHLSTEDT ET AL. 2014). Zu diesem Zweck wurden seit 1993 jährlich etwa 120 ha Buchenvoranbau etabliert (FRISCHBIER ET AL. 2014). Um einiges ambitionierter sind die Pläne für den sächsischen Landeswald: Die Beteiligung der Buche soll perspektivisch von derzeit gerade einmal 5 % auf ebenfalls 27 % der Baumartenzusammensetzung erhöht werden (EISENHAUER & SONNEMANN 2009). Um dieses Ziel zu erreichen, nimmt die Buche etwa 40–60 % der jährlich rund 1.300 ha Umbaufläche im Landeswald ein. Dies macht sie zur Schlüsselbaumart des Waldumbaus in Thüringen und Sachsen (BUTTER 2001; LEHMANN 2007; BRAUN 2012; SACHSENFORST 2013a; FRISCHBIER ET AL. 2014).

Oberstes Ziel bei der Umgestaltung der Waldökosysteme sind die zukünftige Sicherung der Stetigkeit der Waldfunktionen sowie eine Verringerung des Betriebsrisikos (BRÄUNIG & DIETER 1999; HERING ET AL. 1999; KÖLLING ET AL. 2005; WAGNER 2007; KNOKE ET AL. 2008; ROESSIGER ET AL. 2013). Darüber hinaus streben die Forstbetriebe für die Zukunft trotz der

stetig sinkenden Flächenpräsenz der „Brotbaumart“ Fichte und erheblicher finanzieller Aufwendungen für den künstlichen Baumartenwechsel mindestens gleichbleibende wirtschaftliche Erlöse an (EISENHAUER ET AL. 2005). Anders als bei Fichtenmassenware gilt für die Buche jedoch der Grundsatz: keine Qualität, kein Preis (NEUMANN & RÖSSLER 2006)! Anders ausgedrückt bedeutet das: Nennenswerte Gewinne sind aus der Buchenwirtschaft nur über hohe Wertholzanteile zu realisieren (NEUMANN & RÖSSLER 2006; SCHUSTER 2009). Die waldbauliche Behandlung der meist über Voranbau in die Fichtenbestände eingebrachten Buche ist daher zwingend auf einen möglichst hohen Anteil qualitativ hochwertigen Holzes (Produktionsziel „Wertholz“) ausgerichtet (LEDER & HILLEBRAND 2001; EISENHAUER ET AL. 2005; SPELLMANN 2005; ECKARDT & ARENHÖVEL 2006; EISENHAUER & SONNEMANN 2008; NAGEL & SPELLMANN 2008). Darunter werden Buchenerdstammstücke verstanden, welche mindestens B-Qualität aufweisen (EISENHAUER ET AL. 2005; BAYERISCHE STAATSFORSTEN 2009; WEIDIG ET AL. 2015). Die Güte bzw. der Wert von Buchenrundholz bemisst sich an den Erlösen, die dieses am Holzmarkt generiert. Folgerichtig definiert LANGHAUSEN (2009) „Wertholz“ wie folgt: *„[...] Holz, das aus Sicht der verarbeitenden Industrie erwünschte Eigenschaften aufweist, ist durch starke Dimensionen in Verbindung mit breiten astfreien Mantelschichten, durch die Abwesenheit der bei Buche verbreiteten fakultativen Kernbildung (Buchen-Rotkern), [...] inneren Holzspannungen sowie sonstigen, generell unerwünschten Merkmalen von Rundholz gekennzeichnet.[...]“* Konkret bedeutet dies, dass Wertholzbuchen auf etwa 25 % ihrer Endbaumhöhe möglichst astfrei sein müssen. Bei Zieldimension ab 60 cm sollte der asthaltige Kern am schwächsten Ende 20 cm nicht übersteigen. Die Äste im Kern müssen gesund, möglichst dünn und fest verwachsen sein (WILHELM ET AL. 1999c; NEUMANN & RÖSSLER 2006). Die übergeordnete Wert entscheidende Eigenschaft ist die Astreinheit des Holzmantels. Auf diesem Faktor liegt folglich das Hauptaugenmerk aller waldbaulichen Maßnahmen im Zusammenhang mit der Wertholzerziehung (WILHELM ET AL. 1999c; WILHELM & RIEGER 2013).

Vor dem Hintergrund dieser Produktionsziele für Buchenbestände wurden in den vergangenen Jahren zahlreiche Untersuchungen zur Qualitätsentwicklung von Buchenvoranbauten unter Fichtenschirm und deren Beeinflussbarkeit durch waldbauliche Maßnahmen durchgeführt. Unter diesen besteht weitgehend Konsens darüber, dass Wachstum und Qualität junger Buchen im Wesentlichen durch die Pflanzenzahl als Maß der intraspezifischen Konkurrenz (RUMPF & PETERSEN 2008), die Intensität der Altholzüberschirmung (GRALLA ET AL. 1997; SHAHNAVAZI ET AL. 2005; LINNERT 2009) sowie



die Interaktion beider Faktoren beeinflusst werden (LEDER & WEIHS 2000; LEONHARDT & WAGNER 2006; WAGNER ET AL. 2010).

Aus diesen Erkenntnissen leitet sich die Notwendigkeit ab, den Fichtenschirm auch geraume Zeit nach der Etablierung der Buchenverjüngung zu erhalten, um ihn als waldbauliches Instrument zur Regulierung der Strahlungsversorgung für die Voranbauten („edle Halbschattform“) nutzen zu können. Doch genau daraus ergibt sich ein Dilemma, denn Letzteres steht in starkem Widerspruch zur Stabilitätssituation vieler Fichtenbestände. Das belegt deren im Vergleich zu anderen Baumarten und Bestandestypen besonders ausgeprägte Disposition gegenüber Sturm- und Insektenkalamitäten (BRÄUNIG & DIETER 1999; DVORAK ET AL. 2001; DOBBERTIN ET AL. 2002; HANSEN & SPIECKER 2005; TLWJF 2008; ALBRECHT 2009; SCHMIDT ET AL. 2010). Gestützt wird diese Einschätzung durch neuere empirische Modellierungen anhand von Windwurfereignissen in Südwestdeutschland: Von allen berücksichtigten Faktoren leistet die Baumart den größten Beitrag zur Erklärung des Sturmwurftrisikos eines Waldbestandes. Dabei erwiesen sich Fichte (und Douglasie) eindeutig als sturmanfälligste Baumarten (ALBRECHT ET AL. 2012). Zu identischen Ergebnissen kamen CLASEN ET AL. (2008) bei ihrer Ursachenanalyse zum Schadausmaß infolge des Orkans KYRILL in Thüringen. Bezogen auf den Landeswald entfielen 88,5 % der geschädigten Holzbodenfläche allein auf die Fichte (CLASEN ET AL. 2008). Hinzu kommt, dass die zur Förderung der vorangebauten Buche notwendige Auflichtung des Fichtenschirms dessen kollektive Stabilität zusätzlich mindert, sodass das Risiko für die genannten Schadfaktoren nochmals steigt (KÖNIG 1995; ALBRECHT 2009; ALBRECHT ET AL. 2012; GRIESS ET AL. 2012; RICHTER 2015). Prognosen einer voranschreitenden Klimaveränderung gehen für ein breites Standortspektrum von weiteren Vitalitätsverschlechterungen der Fichte, insbesondere außerhalb ihres natürlichen Verbreitungsgebiets, aus (PROFFT ET AL. 2007; AMMER ET AL. 2008a; KÖLLING ET AL. 2009). In Verbindung mit einer zukünftig zu erwartenden Erhöhung der Frequenz und Intensität extremer Witterungsereignisse ist ein steigendes Kalamitätsrisiko der Fichtenforste sehr wahrscheinlich (THOMASIUS 1991; BENISTON ET AL. 2007; MAJUNKE ET AL. 2008).

So wurden beispielsweise durch den Orkan KYRILL im Januar 2007 in den Wäldern Thüringens rund 2,9 Mio. Festmeter Holz geworfen, sodass auf rund 6.300 ha Kahlflächen entstanden (SEILER ET AL. 2007; VOBHAGE 2008). In Sachsen fielen immerhin 1,8 Mio. Festmeter Holz zu Boden, auch hier vorrangig in Fichtenbeständen. Damit hinterließ KYRILL auf rund 1.300 ha Kahlflächen (STAATSBETRIEB SACHSENFORST 2008). Nicht wenige dieser



Flächen waren zuvor bereits mit Buche vorangebaut worden. Oftmals befanden sich diese Voranbauten jedoch in einem Entwicklungszustand, der ihre Verselbstständigung aus qualitativer Sicht nicht sinnvoll erscheinen ließ, sodass um die Erreichung des Produktionsziels „Wertholz“ und die damit verbundenen Holzerlöse gekämpft werden muss.

Bisher liegen zu dieser Thematik keine wissenschaftlichen Untersuchungen vor. Aus diesem Grund wurde in einem von der ThüringenForst-A.ö.R. sowie dem Staatsbetrieb Sachsenforst finanzierten Forschungsprojekt den Folgen eines plötzlichen, unplanmäßigen Schirmverlusts für Wachstum und Qualität von Buchenvoranbauten nachgegangen. In diesem Kontext stand auch die Bedeutung von Pflanzendichte und Entwicklungsstadium (Standzeit) der Voranbauten im Fokus der Forschung. Ziel der Untersuchung war es, qualitätsorientierte Prognosen und entsprechende waldbauliche Handlungsempfehlungen für sturmbedingt freigestellte Voranbauten unterschiedlicher Pflanzendichte und verschiedenen Alters abzuleiten. Darauf aufbauend sollten Empfehlungen für ein zukünftig stärker am Risikopotenzial des Altbestands orientiertes Vorgehen beim Buchenvoranbau entwickelt werden.

## **1.2 Zielstellung und Arbeitshypothesen**

Gemäß dem im vorangegangenen Abschnitt dargelegten Forschungsbedarf konzentriert sich die vorliegende Untersuchung auf den Effekt von drei Haupteinflussfaktoren auf die Qualität freigestellter Buchenvoranbauten. Erwartungsgemäß bildet der Faktor Schirmverlust dabei den Kern der Arbeit. Die Gegenüberstellung der Ergebnisse bisheriger Forschungsarbeiten zur Qualität von Buchenverjüngungen auf Freiflächen (vgl. LE TACON 1985; LEDER & HILLEBRAND 2001; OTT ET AL. 2003) sowie unter Schirm (vgl. KURTH 1946; PETERSEN & WAGNER 1999; LEDER & WEIHS 2000; SHAHNAVAZI ET AL. 2005) sind ein eindeutiger Beweis der qualitätsfördernden Wirkung einer langfristigen, wohldosierten Überschirmung. Für die vorliegende Untersuchung ist daraus folgende Arbeitshypothese abzuleiten:

*Hypothese 1: Der Fichtenschirm als Steuerinstrument der Ressourcenversorgung (vor allem Strahlung) spielt für die Qualifizierung von Buchenvoranbauten eine herausragende Rolle („edle Halbschattform“). Folglich geht ein frühzeitig und plötzlich eintretender Schirmverlust infolge der damit verbundenen drastischen Umweltveränderung grundsätzlich mit Qualitätsverlusten im Voranbau einher.*

Der zweite für die Qualitätsdifferenzierung von Buchenverjüngungen maßgebliche Einflussfaktor ist die intraspezifische Konkurrenz. Diese kann über die Pflanzenzahl pro

Hektar, also die Dichte des Voranbaus, quantifiziert werden. Aus bisherigen Untersuchungen geht eine signifikant positive Korrelation zwischen Pflanzendichte und Buchenqualität hervor (vgl. KURTH 1946; KLEIN 1983; SCHENK 1994; RICHTER 1999; RUMPF & PETERSEN 2008; ROZENBERGAR & DIACI 2014). Daraus leitet sich die zweite Arbeitshypothese ab:

*Hypothese 2: Die qualitative Entwicklung des Buchenvoranbaus nach einem Schirmverlust ist von der Pflanzenzahl pro Flächeneinheit bzw. dem Standraum pro Buche abhängig. Es wird erwartet, dass der Schirmverlust bei dicht begründeten Voranbauten (geringer Standraum je Buche) aufgrund der höheren intraspezifischen Konkurrenz weniger negative Auswirkungen auf die Qualität hat als bei weitständigen Verjüngungen (großer Standraum je Buche).*

Die Wirkung der Pflanzendichte bzw. der durch sie gesteuerten intraspezifischen Konkurrenz, ist vom Bestandesschluss des Voranbaus abhängig. Erst mit Erreichen des Dickungsstadiums treten die Buchen miteinander in Konkurrenz um Wuchsraum und setzen somit die waldbaulich gewünschte gegenseitige Wachstums- und Qualitätsbeeinflussung in Gang (MITSCHERLICH 1970; LEIBUNDGUT 1978; AMMER ET AL. 2005; LEONHARDT & WAGNER 2006). Zugleich bildet der geschlossene Buchenvoranbau ein eigenes, die Einzelbäume schützendes Waldinnenklima aus (MITSCHERLICH 1970; OTTO 1994). Dadurch ist der Schutz eines Altbestandes vor extremen abiotischen Einflüssen nicht mehr in dem Maß vonnöten wie noch in der Jungwuchsphase. Daraus ergibt sich die dritte Annahme:

*Hypothese 3: Die Qualitätsentwicklung eines freigestellten Buchenvoranbaus ist von dessen Entwicklungsstadium zum Zeitpunkt des Schirmverlusts abhängig. Es wird angenommen, dass Voranbauten, die zum Freistellungszeitpunkt den Bestandesschluss noch nicht erreicht hatten, stärker vom Schirmverlust betroffen sind als solche, die sich bereits im Dickungsschluss befanden.*

LEONHARDT & WAGNER (2006) stellten bei ihren Untersuchungen zur Qualität von Buchenvoranbauten eine Interaktion zwischen Pflanzendichte und Überschirmungsintensität fest, welche jedoch erst ab einer Standzeit von mindestens 16 Jahren auftrat. Auch für die vorliegende Arbeit ist anzunehmen, dass die genannten Faktoren hinsichtlich ihrer Wirkung auf die Buchenqualität nicht isoliert voneinander betrachtet werden dürfen. Deshalb ist es ein zentrales Anliegen der vorliegenden Untersuchung, auch die Wechselbeziehungen, die möglicherweise zwischen den einzelnen Versuchsfaktoren bestehen, hinsichtlich ihrer Bedeutung für Wachstum und Qualität der Buchen abzubilden.

## **2 Material und Methoden**

### **2.1 Untersuchungsgebiet**

#### **2.1.1 Anforderungen an ein Untersuchungsgebiet**

Aufgrund der gemeinsamen Finanzierung des Forschungsprojekts durch den Staatsbetrieb Sachsenforst sowie die ThüringenForst-A.ö.R wurde die Auswahl des Untersuchungsgebiets auf die Landeswaldflächen der beiden Freistaaten begrenzt. Grundsätzlich sollte in Sachsen und Thüringen jeweils eine für die zu untersuchende Fragestellung repräsentative Modellregion ausgewählt werden. Ausschlaggebende Kriterien für die Eignung als Untersuchungsgebiet waren folgende Gegebenheiten:

- Großflächige Präsenz gleichaltriger, einschichtiger Fichtenreinbestände, welche aufgrund ihrer Stabilitätssituation ein hohes Kalamitätsrisiko aufweisen, sodass Waldumbaumaßnahmen dringlich sind. Es handelt sich dabei namentlich um Gebiete, in denen Fichtenforste auf potenziellen Buchen- bzw. Buchenmischwaldstandorten stocken (BUTTER 2001; EISENHAUER & SONNEMANN 2009).
- Eine seit mindestens zwei Jahrzehnten andauernde konsequente Umsetzung von Waldumbaumaßnahmen in Fichtenreinbeständen durch Buchenvoranbau.
- Erhebliche Sturmwurfeschäden durch den Orkan KYRILL vom 18./19. Januar 2007. Dieser Sturm dient als synchronisierendes Freistellungsereignis. Dadurch wird gewährleistet, dass alle betrachteten Buchenvoranbauten zu einem identischen Zeitpunkt freigestellt wurden, was ihre uneingeschränkte Vergleichbarkeit gewährleistet. Aus diesem Grund wurden ausschließlich durch den Orkan KYRILL geräumte Buchenvoranbauten berücksichtigt.

Diese Anforderungen erfüllen vor allem die unteren und mittleren Lagen der Mittelgebirge sowie deren Vorlandbereiche, welche die Schwerpunktgebiete des Waldumbaus in Fichtenbeständen darstellen (vgl. WAGNER & HENKEL 1993; EISENHAUER & SONNEMANN 2008, 2009). Dementsprechend wurden die beiden Modellregionen „Sächsisches Erzgebirge und Vorland“ sowie „Thüringer Wald und Hügelland“ für die Untersuchung bestimmt.

## 2.1.2 Modellregion „Sächsisches Erzgebirge und Vorland“

### 2.1.2.1 Klima und Standort

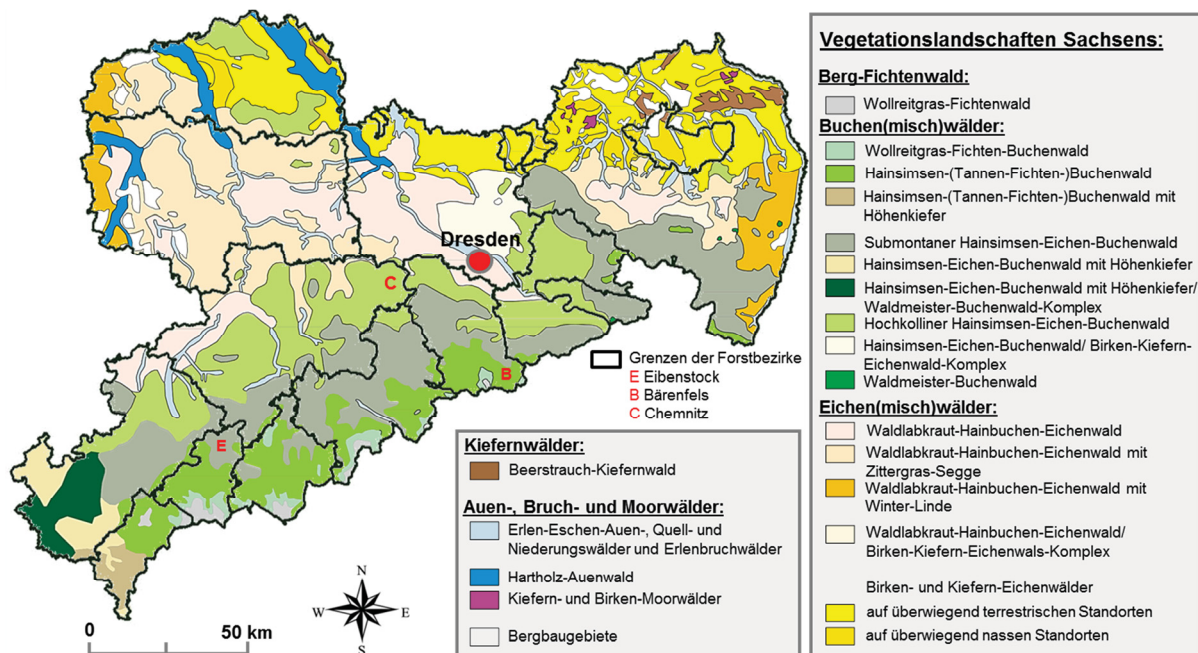
Die Modellregion „Sächsisches Erzgebirge und Vorland“ wird in der vorliegenden Arbeit durch die drei Forstbezirke Bärenfels im Osten, Eibenstock im Westen sowie Chemnitz im Vorland des Erzgebirges repräsentiert. Während die beiden Erstgenannten dem Wuchsgebiet „Erzgebirge“ angehören, ist der letzte der genannten Forstbezirke vornehmlich dem „Erzgebirgsvorland“ zuzuordnen. Neben den abweichenden geologischen Ausgangssubstraten grenzen sich die verschiedenen Bereiche des Sächsischen Mittelgebirges vor allem klimatisch voneinander ab. Das Klima im Erzgebirge wird dabei maßgeblich von drei Faktoren bestimmt: der West-Ost-Ausdehnung, der Höhenstufung und der Reliefausbildung (SCHWANECKE & KOPP 1996; BASTIAN 2008). So liegen die Jahresniederschlagssummen im Luv-beeinflussten Westerzgebirge um etwa 100 mm über jenen des östlichen, Lee-geprägten Teils. Zudem ist mit steigender Höhe über dem Meeresspiegel eine Zunahme der jährlichen Niederschlagssummen bei zugleich sinkenden Jahresdurchschnittstemperaturen zu verzeichnen. Diese Phänomene sind auch für die Gliederung des Erzgebirges in Wuchsbezirke ausschlaggebend (SCHWANECKE & KOPP 1996). Die im Untersuchungsgebiet vorkommenden Wuchsbezirke werden in Tabelle 1 charakterisiert.

**Tabelle 1:** Klimatische und geologische Charakterisierung der im sächsischen Untersuchungsgebiet auftretenden Wuchsbezirke. Nach SCHWANECKE & KOPP (1996).

Wuchs- gebiet	Wuchsbezirk	Höhen- lage [m ü. NN]	Ø Jahres- temperatur [°C]	Ø Jahres- nieder- schlag [mm/Jahr]	geologisches Ausgangs- substrat	Boden
<b>Erzgebirge (45)</b>	Östliches Oberes Erzgebirge (4503)	700–900	4,0–5,5	900–1.000	Porphyry, Granit, Phyllit, Gneis	Podsol, Braunpodsol, Polygonböden
	Nordwest- abdachung des Erzgebirges (4504)	300–700	5,5–8,0	780–1.000	Granit, Phyllit, Schiefer	Braunpodsol, podsolige Braunerde
	Obere Nordab- dachung des Osterzgebirges (4506)	500–750	5,5–7,2	800–920	Quarzporphyry, Granit, Granitporphyry	Braunerde, Braunpodsol
	Untere Nordabdachung des Mittleren Erzgebirges (4507)	300–500	6,5–7,8	780–900	Gneis, Quarzporphyry, Kreidesandstein, z. T. Lößdecken	(podsolige) Braunerde, Podsol, Staugley
<b>Erzgebirgs- vorland (26)</b>	Südliches Mulde- Lößhügelland (2605)	300–370	7,5–8,5	700–800	Löß über Granulit, Schiefer, Phyllit	Lößstaugley, Gesteins- braunerde

### 2.1.2.2 Natürliche Vegetation und waldbauliche Ausgangslage

Aufgrund der klimatischen Gegebenheiten des Erzgebirges folgen die potenziellen natürlichen Waldgesellschaften einer für herzynische Mittelgebirge typischen höhenzonalen Gliederung (BASTIAN 2008). In den submontanen unteren Berglagen herrschen Hainsimsen-Eichen-Buchenwälder vor, welche in den montanen mittleren Lagen in Hainsimsen-(Tannen-Fichten-)Buchenwälder übergehen. Die hochmontane Stufe ist von Fichtenwäldern geprägt (SCHWANECKE & KOPP 1996; SCHMIDT ET AL. 2002; BASTIAN 2008). Auch pollenanalytische Untersuchungen in den Hochmooren des Erzgebirges belegen eindrucksvoll, dass einst Mischwälder aus Buche, Tanne und Fichte das Waldbild im Sächsischen Mittelgebirge dominierten. Allein in den höheren Lagen gewann die Fichte die Oberhand (RUDOLPH & FIRBAS 1924; REINHOLD 1942). In weiten Teilen Sachsens ist die Buche folglich die prägende Baumart der natürlichen Waldgesellschaften (Abbildung 1).



**Abbildung 1:** Vegetationslandschaften Sachsens aus standörtlich-vegetationskundlicher Sicht. Kartengrundlage aus LAF (1997), verändert.

Mit Beginn des Erzbergbaus im Mittelalter setzte eine intensive Besiedlungswelle ein, welche mit hohen Holznutzungen und Waldrodungen einherging (SCHWANECKE & KOPP 1996). Der dadurch eintretenden Holznot begegnete man durch eine Umwandlung der ursprünglichen Mischwälder in schnellwachsende Fichtenreinbestände. In der Folge stieg der Fichtenanteil bis Anfang des 20. Jh. in einigen Gebieten auf bis zu 90 % an, während Buche und vor allem Weißtanne fast vollständig verschwanden (KIENITZ 1936; THOMASIU 1990). Durch die einseitige Begünstigung der Fichte und ihre Bewirtschaftung im Altersklassenwald konnte



zwar eine enorme Produktivitätssteigerung erreicht werden, welche jedoch erhebliche, bis in die heutige Zeit reichende ökologische Probleme nach sich zog (THOMASUS 1990, 1994). Als ein Beispiel seien hier die immensen Sturmwurfschäden durch den Orkan KYRILL angeführt, von denen explizit die Fichtenreinbestände massiv betroffen waren (MARTENS 2008). Allein in den Forstbezirken Bärenfels (Osterzgebirge) und Eibenstock (Westerzgebirge) fielen Schadholzmengen von 200.000 Efm bzw. 370.000 Efm an (IRRGANG 2008; SCHUSSER 2009).

Das Erzgebirgsvorland wurde aufgrund seiner standörtlichen Verhältnisse schon früh besiedelt. Zugunsten der ackerbaulichen Nutzung wurde der Wald auf arme und stauvernässte Standortbereiche zurückgedrängt. Mit Aufblühen des Steinkohlebergbaus setzte im 19. Jh. zudem eine starke Industrialisierung ein (SCHWANECKE & KOPP 1996). Infolgedessen wurden die natürlichen Walddlabkraut-Hainbuchen-Eichenwälder und Hainsimsen-Eichen-Buchenwälder stark dezimiert bzw. in Fichtenforste umgewandelt (SCHWANECKE & KOPP 1996; SCHMIDT ET AL. 2002), was eine erhebliche Degradierung der Standorte zur Folge hatte (HAASE & MANNSFELD 2008). Den Analysen von REINHOLD (1942) zufolge bestand die Bestockung der größeren Waldgebiet (z. B. Zellwald, Rossauer Wald) im 16. Jh. vornehmlich aus Tannen-Buchen-Wäldern, wobei berichtet wird, dass die Buchen meist bereits herausgehauen waren.

Aufgrund der aktuellen, kulturhistorisch bedingten Dominanz einschichtiger gleichaltriger Fichtenreinbestände und der prognostizierten klimatischen Veränderungen stellen die unteren und mittleren Berglagen des Sächsischen Erzgebirges das Kerngebiet des Waldumbaus in Sachsen dar. Nach EISENHAUER (2008) liegt der Schwerpunkt des Baumartenwechsels dabei auf Standorten, wo die Fichte schon heute als nicht standortgerecht zu bewerten ist und das Risiko großflächiger Kalamitäten durch die zu erwartende Drift klimatischer Standortfaktoren zukünftig weiter steigen wird. Im Fokus des Waldumbaus in Sachsen stehen demzufolge die Fichtenforste im Lößhügelland und dem heute gemäßigt subozeanisch bis subozeanisch-warmen Klimaareal der Mittelgebirge (IRRGANG 2002; EISENHAUER 2008; SACHSENFORST 2011b). Im letztgenannten Bereich weisen Fichtenbestände der unteren Berglagen sowie der trockenheitsexponierten mittleren Berglagen die höchste Umbaudringlichkeit auf (EISENHAUER & SONNEMANN 2009).

Die Richtlinie zu den Waldentwicklungstypen im Staatswald des Freistaats Sachsen stellt einen nach Ausgangszuständen differenzierten Wegweiser zur Erreichung der langfristig angestrebten Zielzustände der Bestockung im Zuge des Waldumbaus dar (SACHSENFORST

2013b). Ihr zufolge wird ein Buchenvoranbau weiterhin standörtlich differenziert in den unteren und mittleren Berglagen, aber auch im Hügelland erfolgen. Die Buche kommt dabei in verschiedenen Zielzuständen als Hauptbaumart vor. Auf Standorten mittlerer und ziemlich armer Nährkraft bilden Nadelbäume (Weißtanne, Fichte) sowie die Eiche die wichtigsten Mischbaumarten, während Edellaubbäumen in trophisch begünstigten Bereichen Vorrang zu gewähren ist (SACHSENFORST 2013b). Generell bleibt die Buche als Hauptbaumart auf terrestrische Standortbereiche mit langfristig anhaltendem Wasserhaushalt beschränkt (EISENHAUER & SONNEMANN 2009). Seit 1993 wurden im sächsischen Landeswald ca. 9.300 ha Buchenvoranbau angelegt (WEIDIG ET AL. 2015). Die Umgestaltung der Baumartenzusammensetzung im Zuge des Waldumbaus erfolgt dabei unter Berücksichtigung der ökologischen Stabilität der zukünftigen Bestockung sowie wirtschaftlicher Zielvorstellungen (EISENHAUER 2008).

### **2.1.3 Modellregion „Thüringer Wald und Hügelland“**

#### **2.1.3.1 Klima und Standort**

In der zweiten Modellregion „Thüringer Wald und Hügelland“ wurden ebenfalls drei Forstämter für die Untersuchung ausgewählt. Das Forstamt Oberhof ist im Mittleren Thüringer Wald gelegen und erstreckt sich von den Kammlagen bis ins südlich vorgelagerte Südthüringische Trias-Hügelland, das Wuchsgebiet, das für die vorliegende Arbeit von Interesse ist. Das östlich benachbarte Forstamt Frauenwald repräsentiert die mittleren Berglagen des Thüringer Gebirges. Im Süden Thüringens, an der Grenze zum Freistaat Bayern, befindet sich das Forstamt Sonneberg, welches dem im Osten an das Thüringer Gebirge anschließenden Wuchsgebiet Frankenwald, Fichtelgebirge und Steinwald zuzuordnen ist (LAWUF 1997).

Das Klima des Thüringer Waldes wird maßgeblich durch die nordwestlich-südöstliche Ausrichtung des Gebirgszugs bestimmt. Diese bewirkt eine ausgeprägte Luv-Lee-Zonierung und bedingt, dass die Niederschlagssummen kleinräumig sehr stark variieren. Auf der südwestlichen Stauseite, der auch das Untersuchungsgebiet angehört, werden demzufolge vergleichsweise hohe Niederschlagswerte erreicht. Insgesamt besitzt das Klima in der Modellregion einen subatlantischen Charakter (LAWUF 1997).

Ausgesprochen vielgestaltig sind die geologischen Ausgangssubstrate im Untersuchungsgebiet. Während im Thüringer Wald vor allem Vulkanite und Ablagerungen des Rotliegenden sowie Oberkarbons dominieren, herrschen im Schiefergebirge und

Frankenwald Sedimente des Unterkarbons vor. Das Südthüringische Trias-Hügelland ist vom Unteren Buntsandstein geprägt (BUSHART & SUCK 2008). Die Vielfalt der geologischen, orografischen und klimatischen Bedingungen bildet auch die Grundlage der Wuchsgebiets- und Wuchsbezirksgliederung (Tabelle 2).

**Tabelle 2:** Klimatische und geologische Charakterisierung der im thüringischen Untersuchungsgebiet auftretenden (Teil-)Wuchsbezirke. Nach LAWUF (1997).

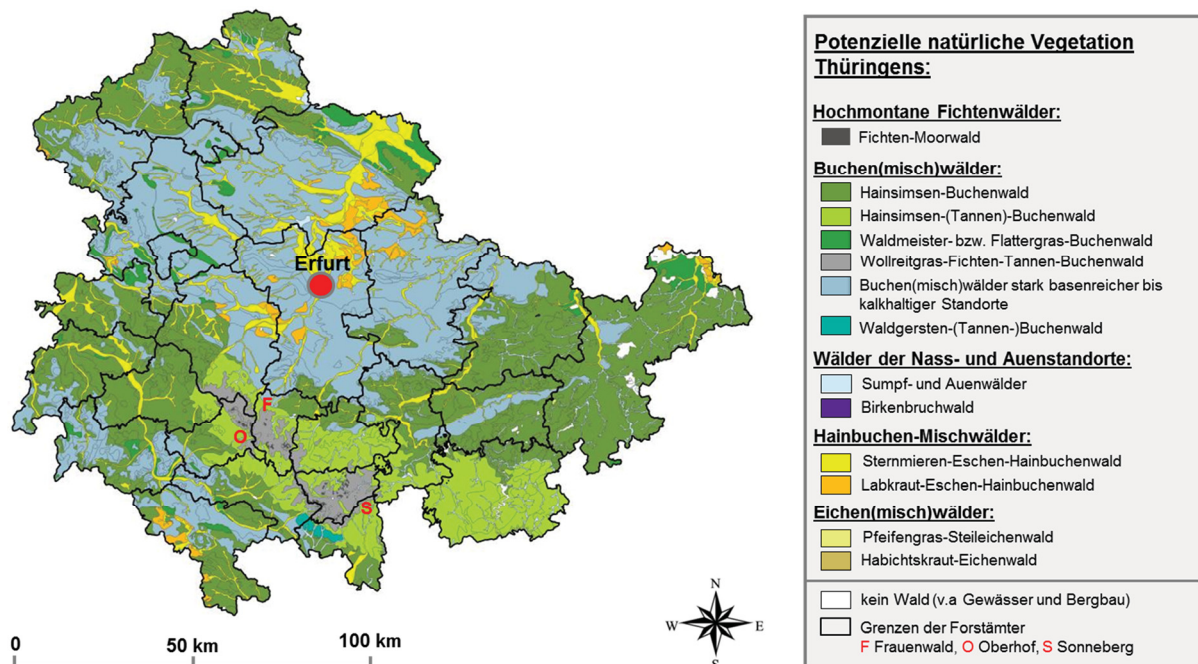
Wuchsgebiet	(Teil-) Wuchsbezirk	Höhenlage [m ü. NN]	Ø Jahres-temperatur [°C]	Ø Jahres-niederschlag [mm/Jahr]	geologisches Ausgangs-substrat	Boden
<b>Thüringer Gebirge (8)</b>	Mittlerer Thüringer Wald (8.2.0)	400–980	4,0–7,0	800–1.200	Rotliegendes, Schiefer, Granit	basenarme Braunerde, z. T. mit Podsolierung
	Schleusetäler (TWB 8.2.1)	430–830	5,0–7,0	1.000–1.100	Rotliegendes, Porphyrit, Granit, Schiefer	Lehmböden, Braunerde, z. T. mit Podsolierung
<b>Frankenwald, Fichtelgebirge, Steinwald (9)</b>	Westlicher Frankenwald (TWB 9.1.1)	390–730	5,0–7,0	900–1.150	Schiefer, Grauwacken	Braunerde
<b>Südthüringisches Trias-Hügelland (11)</b>	Südthüringischer Buntsandstein (TWB 11.2.0)	330–690	6,0–7,0	800–1.000	Buntsandstein, weniger Mergel, Kalkstein	basenarme Braunerde, oft schwache Podsolierung

### 2.1.3.2 Natürliche Vegetation und waldbauliche Ausgangslage

Thüringen ist ursprünglich ein Buchenland, was sich in einer deutlichen Dominanz von Buchenwaldgesellschaften in der potenziellen natürlichen Vegetation des Freistaats manifestiert (HIEKEL ET AL. 2004; ECKARDT & ARENHÖVEL 2006; ARENHÖVEL 2007; BUSHART & SUCK 2008). Die Buche findet hier derart gute Bedingungen vor, dass ihre Höhenverbreitung von 130 m ü. NN im Hügelland bis auf über 900 m ü. NN in den Hochlagen des Thüringer Gebirges reicht (BUSHART & SUCK 2008). Analog zum Erzgebirge ist auch im thüringischen Mittelgebirgsraum eine typische höhenzonale Gliederung der natürlichen Waldgesellschaften gegeben. Auf den trophisch mittleren Standorten der Modellregion herrschen Hainsimsen-Buchenwälder vor. Besser nährstoffversorgte Bereiche würden Waldmeister-Buchenwälder beherbergen. Prägende Mischbaumarten sind die Eiche in der submontanen Stufe sowie die Weißtanne im montanen Bereich. Der hochmontane Hainsimsen-Buchenwald zeigt zudem eine erhebliche Beteiligung der Fichte und geht in den



Kammlagen schließlich in den Wollreitgras-Fichtenwald über (LAWUF 1997; HIEKEL ET AL. 2004) (Abbildung 2).



**Abbildung 2:** Überblick über die potenzielle natürliche Vegetation Thüringens. Grundlage ist die Karte der pnV im Maßstab 1:250.000. Zur besseren Übersichtlichkeit sind die Legendeneinheiten auf der Ebene der Obergruppe bzw. bedeutender Hauptgruppen zusammengefasst. Kartengrundlage aus BUSHART & SUCK (2008), verändert.

Durch menschliche Einflussnahme wurde das natürliche Landschaftsbild der Thüringer Mittelgebirge und angrenzenden Hügellandbereiche maßgeblich verändert und in die heutige Kulturlandschaft verwandelt. Die Besiedlung des Thüringer Waldes geht auf das 11. Jh. zurück. Die natürlichen Laubmischwälder fielen dem großen Holzhunger von Bergbau und Eisenverarbeitung zum Opfer (LAWUF 1997). Hinzu kamen Waldweide, Streunutzung, Nieder- und Mittelwaldwirtschaft sowie in klimatisch geeigneten Bereichen auch großflächige Rodungen zu landwirtschaftlichen Zwecken (HIEKEL ET AL. 2004). Die durch Übernutzung unproduktiv gewordenen Mischwälder wurden vom 18. Jh. an, vor allem aber im Zuge der Industrialisierung in Nadelholzreinbestände umgewandelt. Zeitgleich erfolgten auch großflächige Wiederaufforstungen einst gerodeter Waldflächen, was den bis heute sehr hohen Waldanteil im Mittleren Thüringer Wald und im Schiefergebirge von über 70–80 % begründet (LAWUF 1997; HIEKEL ET AL. 2004). Eine nahezu ausnahmslose Priorisierung der Fichte und die Bewirtschaftung der Wälder im Kahlschlagsystem drängten Buche und vor allem Weißtanne währenddessen stark zurück, sodass noch heute gleichaltrige Fichtenreinbestände das Waldbild prägen (SCHABER 1933; THOMASIU 1990; LAWUF 1997; HIEKEL ET AL. 2004).

Diese Fichtenforste sind zumindest in weiten Teilen der unteren und mittleren Berglagen nicht standortgerecht, sodass von einem starken Gegensatz zwischen aktueller und potenziell natürlicher Baumartenzusammensetzung sowie den damit verbundenen funktionalen Risiken auszugehen ist (PROFFT ET AL. 2007; FRISCHBIER ET AL. 2010). Dies beweisen auch die verheerenden Sturm-, Insekten- und Schneebruchereignisse, von denen der Thüringer Wald in der Vergangenheit wiederholt heimgesucht wurde (WAGNER & HENKEL 1993; ARENHÖVEL 1996; LAWUF 1997). Überdies waren die Thüringer Mittelgebirge – vor allem die dortigen einschichtigen Fichtenreinbestände – ausgesprochen stark vom Orkan KYRILL im Januar 2007 betroffen (CLASEN ET AL. 2008; VOBHAGE 2008). Eine deutliche Konzentration solcher Sturm- und Folgeschäden trat in den für die Untersuchung ausgewählten Forstämtern Oberhof und Frauenwald mit 265.000 Efm bzw. 255.000 Efm Schadholz auf, womit diese die am stärksten betroffenen Gebiete im Landeswald Thüringens waren. Im Forstamt Sonneberg fielen immerhin 75.700 Efm Sturmholz an (THÜRINGENFORST 2015a).

Aufgrund der geringen ökologischen Stabilität von Fichtenforsten sprach sich bereits SCHABER (1933) für eine Wiedereinbringung von Mischbaumarten der natürlichen Waldgesellschaften aus. Namentlich die Buche sollte aufgrund ihrer hohen Vitalität und Konkurrenzkraft auf diesen Standorten über Voranbau wieder Einzug in die Fichtenwälder halten (SCHABER 1933). Neuere Analysen beziffern die Fläche der umbauotwendigen Bestände allein im Thüringer Gebirge auf bis zu 25.000 ha, sodass dort der Waldumbauschwerpunkt Thüringens liegt (WAGNER & HENKEL 1993; ECKARDT & ARENHÖVEL 2006; OSWALD 2012). Ziel des Waldumbaus in dieser Region ist der Aufbau von standortangepassten, stabilen Mischwäldern in Verbindung mit einer deutlichen Erhöhung des Laubholzanteils, namentlich der Buche (ARENHÖVEL 1996; LAWUF 1997; ECKARDT & ARENHÖVEL 2006). Aus diesem Grund ist die Buche seit den 1990er-Jahren die flächenmäßig bedeutendste Baumart im Rahmen des aktiven Waldumbaus in Thüringen (FRISCHBIER ET AL. 2014).

Der Erlass zur standortgerechten Baumarten- und Bestandeszieltypenwahl für die Wälder des Freistaates Thüringen (vgl. TLWJF 2011) basiert auf Ergebnissen der Standortkartierung sowie regionalisierten, zukunftsgerichteten Klimawandelszenarien (FRISCHBIER & PROFFT 2008; FRISCHBIER ET AL. 2010). Bestandeszieltypen, in denen die Buche als Grundbestand bildende Hauptbaumart auftritt, gelten demzufolge auch unter Beachtung der zu erwartenden klimatischen Verschiebungen auf den meisten Standorten der Untersuchungsregion als standortgemäß (TLWJF 2011). Auf den Gesamtwald Thüringens bezogen eignen sich

Bestandeszieltypen mit Buche als Hauptbaumart für 65 % der Waldfläche (FRISCHBIER ET AL. 2010), was den hohen Stellenwert der Baumart beim Waldumbau in Thüringen verdeutlicht. Seit 1993 wurden im Landeswald Thüringens über 2.600 ha Buchenvoranbau etabliert (WEIDIG ET AL. 2015).

## **2.2 Auswahl der Untersuchungsflächen**

### **2.2.1 Untersuchungsfaktoren**

Gemäß der in Abschnitt 1.2 (S. 5) geschilderten Fragestellung umfasst die Untersuchung drei Faktoren, deren Einzeleffekte und Wechselwirkungen auf das Wachstum und die Qualität der Buchenvoranbauten erforscht werden sollten. Die Flächenauswahl musste so getroffen werden, dass sie die Beantwortung der Arbeitshypothesen erlaubte. Bevor auf die Auswahlkriterien eingegangen wird, sollen darum zunächst die Untersuchungsfaktoren charakterisiert und ihre Faktorstufen differenziert werden:

- Faktor Fichtenschirm

Zur Untersuchung der Auswirkungen eines plötzlichen, sturmbedingten Schirmverlusts auf Wachstum und Qualität von Buchenvoranbauten sollten Voranbauflächen ausgewählt werden, die unter Fichtenschirm etabliert wurden, den Schirmschutz jedoch explizit infolge des Orkans KYRILL verloren haben. Als Maßstab für das Qualitätspotenzial derartiger Buchenvoranbauten unter optimalen Bedingungen mussten zusätzlich Referenzflächen mit intaktem Fichtenschirm einbezogen werden.

→ zwei Faktorstufen: **Freistellung KYRILL, unter Fichtenschirm**

- Faktor Pflanzendichte des Buchenvoranbaus:

Unter dem Begriff „Pflanzenzahl pro Hektar“ wird in dieser Arbeit die Ausgangspflanzenzahl des Voranbaus abzüglich aller Ausfälle der ersten Standjahre verstanden. Die Ausfallraten unter einem aufgelichteten Fichtenschirm ( $B^\circ$ : 0,4–0,6) werden mit 5–20 % angegeben (WAGNER & MÜLLER-USING 1997; HERTRAMPF 2009) und treten hauptsächlich in den ersten Jahren nach der Pflanzung ein (BRUNNER & HUSS 1994; WAGNER & MÜLLER-USING 1997). Diese frühen Abgänge wurden nicht in die Standraumberechnungen einbezogen, da sie auf die Konkurrenzverhältnisse im Voranbau zu keinem Zeitpunkt Einfluss hatten. Ganz anders verhält es sich mit Buchen, welche erst in den letzten Jahren vor der Aufnahme bzw. infolge des Sturmwurfs abstarben. Solche Bäume wurden demzufolge mitgezählt.

Bei der Versuchsflächenauswahl wurden hinsichtlich der Pflanzendichte keine Einschränkungen vorgenommen. Dadurch wird das gesamte im Untersuchungsgebiet vorzufindende Spektrum der Stammzahldichten berücksichtigt, was die Aussagekraft und praktische Tragweite der Ergebnisse erhöht. Die Pflanzenzahlen fließen als kontinuierliche Variable in die Untersuchung ein.

→ keine Faktorstufen: **kontinuierlich**, mindestens von 500 St./ha bis 12.000 St./ha

- Faktor Entwicklungsstadium:

Das Entwicklungsstadium ist Ausdruck des natürlichen Alters der Buchen und losgelöst von der Standzeit des Voranbaus (RÖHRIG ET AL. 2006). Es grenzt Verjüngungen ohne Bestandesschluss (Jungwuchs) von geschlossenen Dickungen (Jungbestand) ab und ist in dieser Untersuchung auf das Datum des Schirmverlustes bezogen. Demzufolge wird ein Buchenvoranbau dem Dickungsstadium zugeordnet, wenn sich dieser bei Schirmverlust im Januar 2007 bereits im Bestandesschluss befand und die Astreinigung zu dem Zeitpunkt bereits eingesetzt hatte (LEIBUNDGUT 1978). War dies nicht gegeben, gehört der Voranbau zum Stadium „vor Dickungsschluss“.

→ zwei Faktorstufen: **vor Dickungsschluss, nach Dickungsschluss**

Die Flächenauswahl sollte möglichst so erfolgen, dass alle Faktorstufenkombinationen über einen weiten Bereich der Pflanzendichte hinweg besetzt sind. Dies stellt die Grundlage einer umfassenden Analyse dar und ermöglicht Qualitätsprognosen für verschiedenste Bestandessituationen.

### 2.2.2 Grundlagen und Auswahlkriterien

Das Ziel der Flächenauswahl bestand darin, in den sechs Forstämtern bzw. Forstbezirken der Modellregionen möglichst viele Buchenvoranbauten auf durch den Orkan KYRILL verursachten Sturmflächen sowie entsprechende Referenzflächen unter Fichtenschirm zu finden, die hinsichtlich ihrer standörtlichen und bestockungsspezifischen Gegebenheiten vergleichbar sind. Darüber hinaus sollte die Untersuchung auf Standortbereiche fokussiert werden, die typisch für Waldumbausituationen von Fichtenbeständen mit Buche sind. Nach diesen Vorgaben wurde ein entsprechender Kriterienkatalog erstellt, der als Grundlage der Flächenauswahl diente. In Tabelle 3 wird zunächst das gewählte Standortspektrum charakterisiert. Der für die Untersuchung eingegrenzte Standortbereich entspricht weitgehend jenem, für den in den Modellregionen Thüringens und Sachsens ein künstlicher

Baumartenwechsel von Fichte zu Buche im Zuge des Waldumbaus vorgesehen ist (EISENHAUER & SONNEMANN 2009; TLWJF 2011; SACHSENFORST 2013b).

**Tabelle 3:** Standörtliche Vorgaben für die Versuchsflächenauswahl.

	Kriterium	Anforderung
Standort	Klimastufe	Uf(f) bzw. Vf(f), Mf(f), untere Bereiche Hf(f)
	Bodenfeuchtestufe	terrestrische Standorte (T)
	Nährkraftstufe	mittel (M), ziemlich arm (Z)
	Feuchtestufe	mäßig frisch (2), bei mittlerer Nährkraft auch mäßig trocken (3)

Eine zweite Gruppe von Auswahlkriterien betrifft den aufstockenden Bestand (Tabelle 4). Hier wurde besonderer Wert darauf gelegt, dass alle Buchenvoranbauten zumindest bis zum Zeitpunkt der sturmbedingten Freistellung unter vergleichbaren Bestandesbedingungen aufwuchsen. Der Oberstand musste deshalb aus möglichst reinen Fichtenbeständen mit einem Alter von mindestens 75 Jahren bestehen. Ausschlaggebend war zudem, dass alle Fichtenschirme eine vergleichbare Lichtstellung aufwiesen. Diese war so zu wählen, dass den vorangebauten Buchen einerseits ausreichend Strahlung für eine vitale Entwicklung zur Verfügung steht, andererseits aber durch den Halbschatten zugleich eine qualifizierende Wirkung („edle Halbschattform“) eintritt. Als Maß der Bestandesdichte und somit der Ressourcenverfügbarkeit unter dem Altbestand diente der Bestockungsgrad des Fichtenschirms (WAGNER & MÜLLER-USING 1997; KRAMER & AKCA 2002). Als eine in der forstlichen Praxis übliche Größe ist dieser in den Forsteinrichtungsdaten hinterlegt und kann somit für die Flächenauswahl genutzt werden. Speziell im vorliegenden Fall war ein solches Vorgehen nötig, da nach dem Sturmwurf keine erneuten Messungen am Altbestand möglich waren. Auf Basis vorangegangener Untersuchungen im Sächsischen Mittelgebirge wird ein nach Höhenlage differenzierter Bestockungsgrad von 0,4–0,7 als bester Kompromiss zwischen vitalem Wachstum und Qualitätsentwicklung vorangebauter Buchen empfohlen (IRRGANG 1996; HERING ET AL. 1999; HERTRAMPF 2009). Dabei muss die Auflichtung mit zunehmender Höhenlage, bedingt durch ein steigendes Licht- und Wärmedefizit, verstärkt werden (IRRGANG 1996; HERING ET AL. 1999).

**Tabelle 4:** Ertragskundliche Kennzahlen für die Versuchsflächenauswahl. Die Altersangaben sind auf das Jahr 2012 fortgeschrieben. Baumartenanteil und Bestockungsgrad des Oberstandes beziehen sich bei Beständen mit Schirmverlust auf den Zeitpunkt vor KYRILL.

	Kriterium	Oberstand	Verjüngung
Bestockung	Baumart	Gemeine Fichte [ <i>Picea abies</i> (L.) KARST.]	Rotbuche ( <i>Fagus sylvatica</i> L.)
	Entstehungsart		Voranbau durch Pflanzung
	Alter	≥ 75 Jahre	10–30 Jahre
	Baumartenanteil	≥ 80 %	≥ 80 %
	Bestockungsgrad	0,4–0,7	
	Mindestflächengröße	≥ 0,5 ha	≥ 0,5 ha
	Zeitpunkt Schirmverlust	Orkan KYRILL, 18./19. Januar 2007	

Die Kernfrage dieser Untersuchung bilden Wachstums- und Qualitätsentwicklung der an den Halbschatten adaptierten Buchen nach einem plötzlichen, unvorbereiteten Verlust des Fichtenschirms. Um die uneingeschränkte Vergleichbarkeit aller vom Sturmwurf betroffenen Flächen sicherzustellen, musste der Schirmverlust zu einem identischen Zeitpunkt eingetreten sein. Die größtmögliche Verfügbarkeit solcher Bestandessituationen ließ der Orkan KYRILL vom 18./19. Januar 2007 erwarten, der aus forstlicher Sicht das stärkste Sturmschadensereignis seit der Jahrtausendwende darstellte (MAJUNKE ET AL. 2008). Dieser Orkan wurde als synchronisierendes Freistellungsereignis verwendet, sodass in der vorliegenden Arbeit ausschließlich Voranbauten Berücksichtigung finden, die durch KYRILL freigestellt wurden.

Die vorangebauten Buchen bilden den zentralen Untersuchungsgegenstand, sodass die Bestände diesbezüglich sehr sorgfältig auszuwählen waren. Dem Forschungsansatz liegt die Hypothese zugrunde, dass junge Buchen ihre anatomischen und morphologischen Eigenschaften entsprechend der gegebenen Ressourcenausstattung (vor allem Strahlung) entwickeln und sich dadurch an die ökologischen Bedingungen unter einem Fichtenschirm adaptieren können. Beispielsweise ist bekannt, dass sich die fotosynthetisch relevanten Blatteigenschaften (LICHTENTHALER ET AL. 1981; UEMURA ET AL. 2000; ARANDA ET AL. 2001; BARNA ET AL. 2009; FINDEISEN 2015), aber auch die Architektur der Pflanze (CANHAM 1988; DIACI & KOZJEK 2005; ROZENBERGAR & DIACI 2014) an die jeweiligen Lichtverhältnisse anpassen. Zumindest Letzteres wirkt sich direkt auf die Qualität der Buchen aus (GRALLA ET AL. 1997; STANCIOIU & O'HARA 2006a; LINNERT 2009). Um zu gewährleisten, dass die jungen Pflanzen diesen Adaptionsprozess bereits vollzogen haben, sollten sie bis zu ihrer Freistellung im Januar 2007 mindestens fünf Jahre unter dem Fichtenschirm gestanden haben. Dadurch wird gewährleistet, dass die sturmbedingte Freistellung für die an den Halbschatten adaptierten Buchen zu einer drastischen Änderung der Umweltbedingungen führte.



Die Analyse von Wachstum und Qualität freigestellter Buchenvoranbauten erlaubt für sich genommen noch keine Aussagen darüber, welche Bedeutung den Untersuchungsfaktoren Schirm, Pflanzendichte und Entwicklungsstadium im Einzelnen beizumessen ist. Das Auftreten unzureichender Qualitäten kann verschiedene Ursachen haben. Dazu zählen z. B. genetische Konstitution (TEISSIER ET AL. 1988; THOMASIU & GÄRTNER 1988; HEUKAMP 1999; HANSEN ET AL. 2003), Standorteinfluss (MARVIE-MOHADJER 1975; SAGHEB-TALEBI 1996; LANGHAUSEN 2009) oder auch die falsche Behandlung des Oberstandes (GRALLA ET AL. 1997; WEIHS & KLAENE 2000; LINNERT 2009). Um derartige Störgrößen auszuschließen, sollten zu den Versuchsflächen mit Schirmverlust jeweils passende Referenzflächen unter Fichtenschirm gemäß den Vorgaben in Tabelle 3 und Tabelle 4 gefunden werden. Sind die freigestellten Bestände und die zugehörigen Referenzen hinsichtlich des Standorts und der Bestockungsmerkmale des Buchenvoranbaus vergleichbar, können mögliche Wachstums- und Qualitätsunterschiede mit hoher Wahrscheinlichkeit auf den Schirmverlust zurückgeführt werden. Aus methodischer Sicht wären darum Flächen optimal, die sturmbedingt freigestellte und weiterhin überschirmte Bereiche in einer Teilfläche bzw. einem Bestand oder zumindest in unmittelbarer Nachbarschaft aufweisen.

### **2.2.3 Datenbankanalyse und Flächenauswahl**

Die Auswahl der Untersuchungsflächen lief in folgenden sieben Arbeitsschritten ab:

a) Anfrage bei Forstämtern/Forstbezirken:

Um einen Überblick über das Auftreten potenzieller Versuchsflächen zu bekommen, wurde eingangs eine Abfrage bei den Forstämtern bzw. Forstbezirken der beiden Modellregionen durchgeführt. Die Leiter der Struktureinheiten wurden um eine Auflistung aller Flächen gebeten, welche den hinsichtlich Standort (Tabelle 3, S. 17) und Bestockungsstruktur (Tabelle 4, S. 18) geschilderten Anforderungen entsprechen. Zunächst sollten nur Buchenvoranbauten mit sturmbedingtem Schirmverlust gemeldet werden. Die Auswahl entsprechender Referenzbestände folgte in einem späteren Arbeitsschritt. Dies erschien insofern sinnvoll, als Voranbauten unter Fichtenschirm einerseits umfänglich vorhanden sind und sich deren Auswahl andererseits direkt an den Gegebenheiten der schirmfreien Untersuchungsflächen orientieren musste. Eine Meldung aller Flächen erfolgte mit Angaben zu Forstadresse, Standortformengruppe, Jahr des Schirmverlusts, Größe der Verjüngungsfläche sowie Alter und Höhe der Buchen zum Zeitpunkt des Schirmverlusts.

b) Analyse in Forsteinrichtungsdatenbanken, DSW2 bzw. WIS:

Um die Übereinstimmung der gemeldeten Bestände mit den Vorgaben der Untersuchung zu überprüfen und möglichst weitere geeignete Flächen zu identifizieren, wurde anschließend eine Datenbankanalyse durchgeführt. Für die thüringische Modellregion wurde hierzu auf die digitale Forsteinrichtungsdatenbank der damaligen Thüringer Landesanstalt für Wald, Jagd und Fischerei (TLWJF) zurückgegriffen. Darin sind die auf den Stichtag der Forsteinrichtung bezogenen Bestandeskennzahlen datenzeilenweise, getrennt nach Baumart und Bestandesschicht, erfasst. Als Datenbankmanagementsoftware diente MICROSOFT ACCESS 2010. Um die für die Untersuchung interessanten Bestände zu selektieren, war ein dreistufiges Vorgehen nötig:

- i. 1. Bestandesschicht: Auswahl aller Bestände in den Forstämtern Oberhof, Frauenwald und Sonneberg, welche Fichte im Oberstand aufweisen und den in Tabelle 4 (S. 18, Spalte „Oberstand“) genannten Anforderungen entsprechen.
- ii. 2. Bestandesschicht: Auswahl aller Waldbestände in den drei Forstämtern, welche Rotbuche im Unterstand haben und die in Tabelle 4 (S. 18, Spalte „Verjüngung“) beschriebenen Anforderungen erfüllen.
- iii. Verschneiden der Ergebnisse aus (i) und (ii): Durch das Verschneiden der in den ersten beiden Arbeitsschritten selektierten Waldbestände wurde der Flächenpool auf diejenigen Bestände eingegrenzt, welche mit Buche vorangebaut sind und zumindest bis zum Stichtag der letzten Forsteinrichtung auch einen Fichtenschirm aufwiesen.

Diese Flächenauswahl basiert auf den Bestockungsmerkmalen zum Stichtag der aktuellen Forsteinrichtungsperiode. Um die Auswahl zu präzisieren und die aktuellen Bestockungsverhältnisse einfließen zu lassen, wurde in einem nächsten Schritt der *Datenspeicher Wald (DSW2)* herangezogen. In dieser Datenbank zur Forsteinrichtungs- und Naturalbuchführung sind Bestockungs- und Standortinformationen auf Bestandesebene datenzeilenweise gespeichert. Es erfolgt eine jährliche Fortschreibung für Alter, Vorrat, Höhe und Durchmesser der Waldbestände, wobei auf hinterlegte Wachstumsmodelle zurückgegriffen wird. Zudem sind durch den Revierleiter gebuchte Vollzüge (z. B. Hiebsmaßnahmen) sofort abrufbar. Die aus dem DSW2 abgegriffenen Daten entsprechen somit immer dem aktuellen Zustand des Bestandes (WOLFF ET AL. 1998; REDMANN & REGENSTEIN 2010), sodass auch sturmbedingte Schirmverluste über Buchenvoranbauten leicht identifiziert werden können.

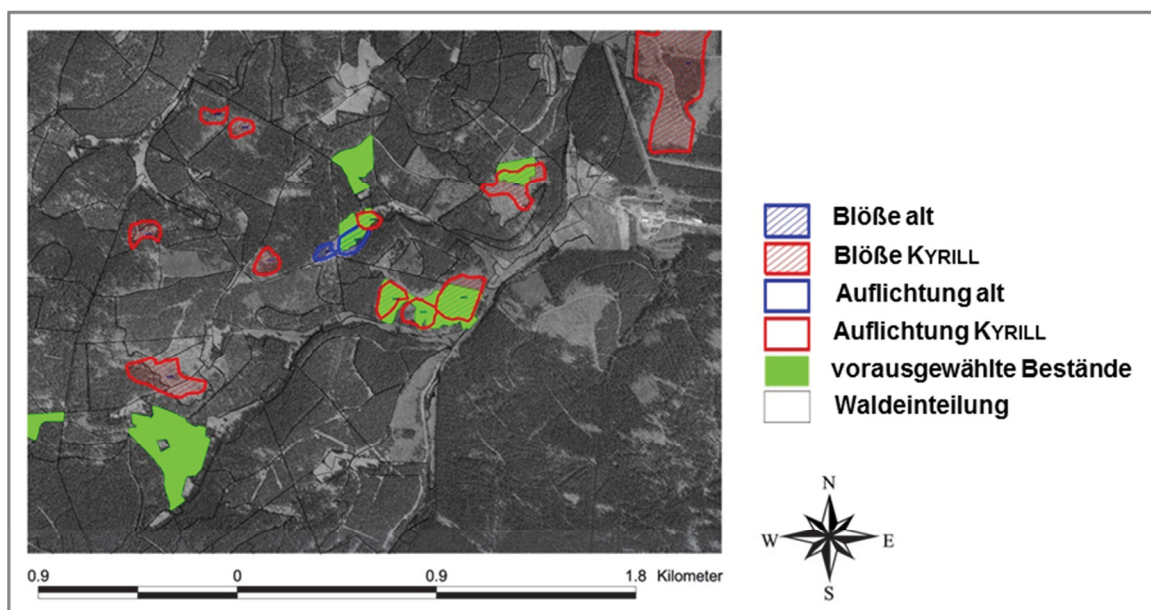


Für diejenigen Forstämter, die erst nach dem Orkan KYRILL (ab 2007) eingerichtet wurden, war eine weitere Datenbankabfrage nötig. Begründet war dies dadurch, dass vom Sturm geworfene Fichtenbestände, welche zuvor bereits mit Buche vorangebaut waren, in der anschließenden Forsteinrichtung nicht mehr als Fichtentypen auftreten. Vielmehr bildet nun die Buche die erste Bestandesschicht, sodass für die Forstämter Frauenwald und Oberhof eine zweite Abfrage vorgenommen werden musste. Dabei wurde von der Annahme ausgegangen, dass sich die vorangebaute Rotbuche im Oberstand befindet.

In gleicher Weise wurde auch bei der Flächensuche in Sachsen vorgegangen. Hier stand die digitale Forsteinrichtungsdatenbank *Waldinformationssystem Sachsen (WIS)* des Staatsbetriebs Sachsenforst zur Verfügung.

c) GIS-gestützte Kontrolle der Oberstandssituation:

Auf Basis der Datenbankabfrage allein konnte nicht hinreichend geklärt werden, ob ein Buchenvoranbau durch ein Kalamitätsereignis freigestellt wurde. Ebenso lagen keine Informationen über die Intensität und den Flächenumfang des Sturmwurfs in den einzelnen Beständen vor. In einem weiteren Schritt galt es daher, die Oberstandssituation aller vorausgewählten Flächen luftbildgestützt zu kontrollieren. Dies geschah mittels digitaler Forstgrundkarte und eines aktuellen Orthofotos (Aufnahme nach 2007) im Geoinformationssystem (Software QUANTUM-GIS 1.7.4).



**Abbildung 3:** Beispiel einer GIS-gestützten Flächensuche im Thüringer Forstamt Frauenwald unter Verwendung von Forstgrundkarte und Sturmflächen-Shape.

Für die Flächensuche in Thüringen erwiesen sich in diesem Zusammenhang eine nach KYRILL durchgeführte, GPS-gestützte Ortung und Vermessung aller Schadflächen sowie

deren Kategorisierung nach „Kronendachverlichtung“ und „Blöße“ als sehr hilfreich. Diese Informationen standen ebenfalls als ESRI-Shape zur Verfügung. Durch Verschneiden der digitalen Forstgrundkarte aller vorausgewählten Bestände mit diesem Sturmflächen-Shape konnten die passenden Bestände schnell und einfach identifiziert werden (Abbildung 3).

Für die sächsischen Forstbezirke wurde ein ähnliches Vorgehen unter Verwendung der ESRI-Shapes „fgd\_we\_f“ (Waldeinteilung als Flächen) und „adv\_dop“ (digitales Orthofoto, Bodenauflösung 20 cm, Aufnahme von 2008) verwendet. Eine beispielhafte Darstellung des Vorgehens ist Abbildung 4 zu entnehmen. Bestände, bei denen nur kleinflächige Durchbrechungen bzw. Auflichtungen des Kronendachs erkennbar waren oder die auf einer Fläche von weniger als 0,5 ha durch den Sturm geräumt wurden, waren im Rahmen dieses Arbeitsschritts zu verwerfen. Auch Bestände mit Restvorräten des Fichtenschirms (Abbildung 4, Bild links), die aufgrund von  $B^{\circ} \leq 0,2$  im Forsteinrichtungswerk nicht mehr als eigene Oberstandsschicht geführt sind (SACHSENFORST 2011a), wurden verworfen, da trotz der geringen Schirmwirkung von einer Inhomogenität der ökologischen Bedingungen auszugehen ist. In die Untersuchung flossen ausschließlich Buchenvoranbauten ein, über welchen der Fichtenschirm restlos geworfen wurde (Abbildung 4, Bild rechts).



**Abbildung 4:** GIS-gestützte Kontrolle der Überschirmungssituation mittels Orthofoto und Waldeinteilung in zwei vorausgewählten, mit Buche vorangebauten Beständen des Forstbezirks Eibenstock. Fichtenschirme, bei denen der Sturm lediglich zu kleinflächigen, unregelmäßigen Unterbrechungen des Kronenschlusses geführt hat, beispielsweise in der Teilfläche 230a6 im Revier Carlsfeld (Bild links), sind für die Untersuchung ungeeignet. Idealerweise sollte der Fichtenschirm komplett durch den Sturm geworfen worden sein, wie in der Teilfläche 45a1 des Reviers Grünheide, sodass homogene Bedingungen auf der Flächen herrschen (Bild rechts).

d) GIS-gestützte Kontrolle der Standorteigenschaften:

Bisher orientierte sich die Flächenauswahl ausschließlich an Bestockungsmerkmalen. Diese wurden im vierten Arbeitsschritt durch standörtliche Merkmale ergänzt. Mit einem Revierbuchauszug aus DSW2/WIS sowie einer digitalen Standortkarte wurden Klima-,

Nährkraft- und Feuchtestufe hinsichtlich der Vorgaben der Untersuchung geprüft und die vom vorgegebenen Standortspektrum abweichenden Flächen verworfen. Als Software diente erneut QUANTUM-GIS (Version 1.7.4).

e) Flächenbesichtigung und Revierleiterbefragung:

Während eines Besichtigungstermins, der nach Möglichkeit gemeinsam mit dem zuständigen Revierleiter erfolgte, wurden die Daten aus den forstlichen Informationssystemen miteinander abgeglichen und um weitere für die Untersuchung wichtige Informationen ergänzt. Dies war erforderlich, da weder im DSW2 noch im WIS Angaben über Entstehungsart (Voranbau/Naturverjüngung), Ausgangspflanzendichte und Herkunft der Buche hinterlegt sind. Diese Informationen wurden von den Revierleitern erfragt, teilweise konnten sie auch den alten Vollzugsdaten entnommen werden. Ferner enthielten die Unterlagen keine Aussagen zur räumlichen Lage der Verjüngungselemente in einem Bestand. Setzt sich der Oberstand aus mehreren Baumarten zusammen, ergibt sich das Problem, dass aus der Datenbank nicht ersichtlich wird, unter welcher Baumart der Buchenvoranbau stockt (WEISER 2012, Angabe für Sachsenforst). Eine Begutachtung aller anhand der Datenbasis geeigneten Fläche war somit unumgänglich. Eine Übersicht über die während der Flächenbesichtigung erhobenen Daten gibt Tabelle 5.

**Tabelle 5:** Im Rahmen der Flächenbesichtigung angesprochene bzw. von den Revierleitern erfragte Daten.

Kriterien	angesprochene Merkmale	Methode der Ansprache
<b>räumliche Lage</b>	Forstadresse, Flächengröße	–
	Baumarten	–
<b>Oberstand</b>	Mischungsanteile	in 5 %-Stufen
	Kronenschlussgrad	gedrängt, geschlossen, locker, licht, räumdig, lückig
	Schirmverlust	ja/nein und Ursache (KYRILL?)
	Baumarten	–
<b>Unterstand</b>	Mischungsanteile	in 5 %-Stufen
	Mischungsform	baum-, trupp-, gruppen-, horstweise
	Entstehungsart der Buche	Voranbau, Naturverjüngung, Saat, Freiflächenkultur
	Verjüngungsfläche	Schätzung der Fläche in ha
	Ausgangspflanzenzahl	Schätzung anhand des Pflanzverbands, Angabe der Spannweite in St./ha
	Entwicklungsstadium	Dickungsschluss bei Schirmverlust bereits erreicht?
<b>Standort</b>	Relief	Ebene, Plateau, Hang, Kuppe, Mulde
	Exposition	Nord, Ost, Süd, West
	Neigung	keine, schwach, stark
<b>Bemerkungen</b>	Schäden	Wildschäden, Fäll- und Rückeschäden, Ausfälle, Konkurrenz durch Mischbaumarten

Ein weiteres wesentliches Ziel der Flächenbegehung bestand in der Zuweisung der Bestände zu den Untersuchungsvarianten. Diese resultieren aus der Kombination der jeweils vorliegenden Faktorstufe von Schirm und Entwicklungsstadium mit der Pflanzendichte des Voranbaus (vgl. Abschnitt 2.2.1, S. 15). Dadurch sollte ein Überblick gewonnen werden, ob mit den bisher ausgewählten Flächen alle Varianten ausreichend repräsentiert sind. Hierzu wurde das Entwicklungsstadium der Buchen anhand der aktuellen Baumhöhe, der Intensität des Bestandesschlusses (Ineinandergreifen der Äste benachbarter Bäume) und des Fortschritts der Astreinigung retrospektiv, das heißt bezogen auf den Zeitpunkt des Schirmverlusts, geklärt. So konnten die Voranbauten zügig und ohne Erhebung metrischer Daten einer der beiden Faktorstufen „vor Dickungsschluss“ bzw. „nach Dickungsschluss“ zugewiesen werden. In diesem Zusammenhang ist ausdrücklich zu betonen, dass dieses vereinfachte Vorgehen lediglich auf die Phase der Flächenauswahl beschränkt ist. Für die spätere Datenanalyse erfolgte eine präzisere, durch metrische Wachstumsdaten (Höhe bei Schirmverlust) gestützte Abgrenzung beider Entwicklungsstadien.

Weiterhin wurde für jeden Voranbau die Pflanzenzahl pro Hektar stichprobenartig erhoben und dabei insbesondere auf die Variation innerhalb der Flächen geachtet. Auch hier wurde zunächst eine Schätzung anhand des Pflanzverbands vorgenommen. Eine präzisere Bestimmung der Standraumverhältnisse erfolgte dann im Zuge der Etablierung der Versuchsanlage (siehe Abschnitt 2.3.1, S. 31). Auffällig war die starke Heterogenität der Stammzahlen innerhalb der einzelnen Flächen. Auf den KYRILL-Flächen waren teilweise empfindliche Ausfälle erkennbar, was eine Rekonstruktion der ursprünglichen Pflanzendichte unmöglich machte. Da aber nur eine Pflanzendichte Aufschluss über die Wirkung unterschiedlicher Standraumverhältnisse geben kann, die die Konkurrenz- und Wachstumsbedingungen der Buchen über eine lange Zeit hinweg geprägt hat, wurden Flächen mit deutlichen Stammzahlverlusten oder starken Schäden am Voranbau von der Untersuchung ausgeschlossen.

f) Auswahl der Referenzflächen:

Nachdem die Hauptuntersuchungsflächen mit sturmbedingter Freistellung feststanden, mussten noch entsprechende Referenzflächen unter Fichtenschirm ausgewählt werden. Dabei wurde zunächst auf die Ergebnisse der unter b) beschriebenen WIS- bzw. DSW2-Abfrage zurückgegriffen und alle Flächen geprüft, welche die Anforderungen an Bestockung und Standort erfüllten, jedoch keinen sturmbedingten Schirmverlust erfahren



hatten. Ergänzend dazu wurden die Revierleiter während der gemeinsamen Vor-Ort-Besichtigung nach passenden Referenzflächen in ihren Revieren gefragt. Auch diese Bestände wurden, wie unter e) beschrieben, taxiert und ausgewählt.

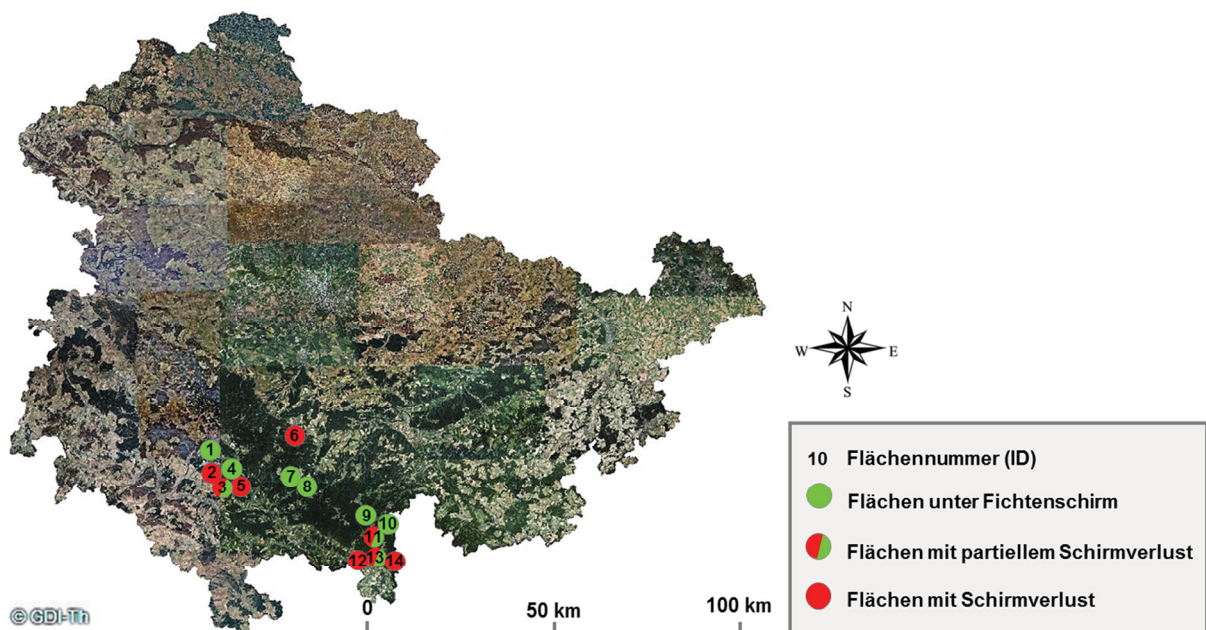
g) Fotografische Dokumentation:

Abschließend wurde jede Fläche fotografisch dokumentiert, sodass die Bestockungsmerkmale gut erkennbar waren. Dadurch konnte die endgültige Flächenauswahl unterstützt und später nachvollzogen werden.

Im Zuge des geschilderten Prozesses konnten insgesamt 29 geeignete Versuchsflächen identifiziert werden. In den folgenden Kapiteln werden diese detailliert beschrieben.

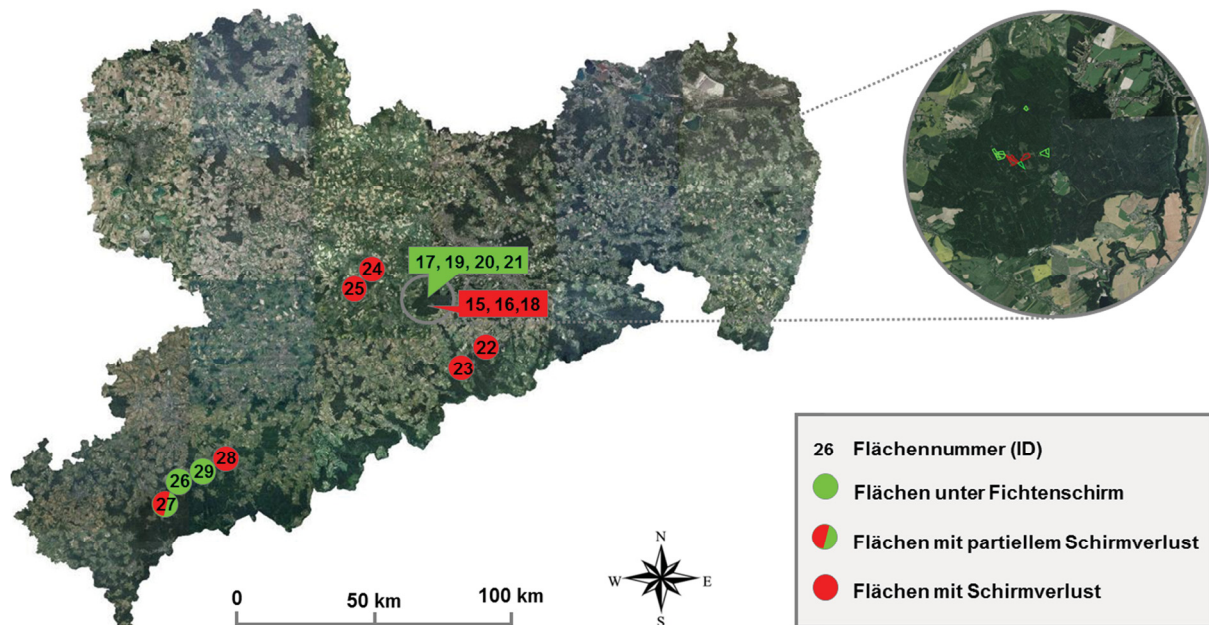
## 2.2.4 Charakterisierung der Untersuchungsflächen

Die 29 Versuchsflächen verteilen sich nahezu gleichmäßig auf die beiden Modellregionen. Von den 14 in Thüringen gelegenen Flächen befinden sich fünf im Bereich des Forstamts Oberhof, drei im Bereich von Frauenwald sowie sechs im Bereich von Sonneberg (Abbildung 5). Mit neun von 15 Flächen bildet der Forstbezirk Bärenfels den Schwerpunkt des sächsischen Untersuchungsgebiets. Zudem sind die Forstbezirke Chemnitz und Eibenstock mit zwei bzw. vier Flächen vertreten (Abbildung 6).



**Abbildung 5:** Geografische Lage der 14 Versuchsflächen in der Modellregion „Thüringer Wald und Hügelland“. Die Flächen 1–5 befinden sich im Bereich des Forstamts Oberhof, 6–8 im Bereich des Forstamts Frauenwald und 9–14 im Bereich des Forstamts Sonneberg. Quelle des Orthofotos: LANDESAMT FÜR VERMESSUNG UND GEOINFORMATION (2015).

Der Flächenpool umfasst insgesamt 13 Waldbestände mit sturmbedingtem Verlust des Fichtenschirms durch den Orkan KYRILL im Januar 2007. Weitere zwölf Buchenvoranbauten unter Fichtenschirm dienen als Referenzen. Eine Besonderheit stellen die Flächen 3, 11 und 13 in Thüringen sowie 27 in Sachsen dar. Hier wurde der Fichtenschirm über einem Teil der mit Buche vorangebauten Bereiche geworfen, während der sonstige Bestand unbeschadet blieb. Diese Flächen dienen sowohl als Freistellungs- als auch als Referenzvariante.



**Abbildung 6:** Geografische Lage der 15 Versuchsflächen in der Modellregion „Sächsisches Erzgebirge und Vorland“. Die Flächen 15–23 befinden sich im Forstbezirk Bärenfels, 24 und 25 im Forstbezirk Chemnitz und 27–29 im Forstbezirk Eibenstock. Quelle des Orthofotos: LANDESVERMESSUNGSAMT SACHSEN (2014).

Die standörtlich-klimatischen Gegebenheiten (Tabelle 6, S. 29) der einzelnen Flächen sind maßgeblich durch die Höhenlage bestimmt. Diese erstreckt sich von 330 m ü. NN im sächsischen Lößhügelland auf bis zu 700 m ü. NN in den höheren Lagen von Westerzgebirge und Thüringer Wald. Dementsprechend sind die forstlichen Klimastufen der unteren bis höheren Berglagen von einem feuchten, in der Modellregion Thüringens vornehmlich von einem sehr feuchten Klima geprägt. Die Jahresmitteltemperaturen variieren zwischen 6,2 °C in den höchstgelegenen Flächen und 8,8 °C im sächsischen Hügelland. Damit verbunden ist eine Zunahme der Vegetationszeitlänge von etwa 120 Tagen pro Jahr auf 170 Tage pro Jahr. Die Jahresniederschläge steigen von 720 mm pro Jahr im Erzgebirgsvorland auf bis zu ca. 1.200 mm im Mittleren Thüringer Wald und Frankenwald.

Die eingangs festgesetzte Beschränkung der Flächenauswahl auf terrestrische Standorte (Bodenfeuchtestufe „T“) konnte aufgrund mangelnder Flächenverfügbarkeit in der sächsischen Modellregion nicht aufrechterhalten werden. Namentlich in den Forstbezirken

Chemnitz und Bärenfels musste in sechs Fällen auf wechselfeuchte Standorte ausgewichen werden. Hinsichtlich der Nährkraftstufe sind allein die Flächen im Forstbezirk Eibenstock als ziemlich arm einzustufen, alle anderen Standorte weisen eine mittlere Trophie auf.

Eine Übersicht über die aktuellen Bestockungsverhältnisse auf den Versuchsflächen ist Tabelle 7 (S. 30) zu entnehmen. Die Fichtenschirme auf den Referenzflächen waren, von einer Ausnahme abgesehen, zwischen 75 und 153 Jahre alt. Bei Grundflächenhaltungen von 21–35 m<sup>2</sup>/ha ergeben sich in Abhängigkeit von der Bonität der Bestände überwiegend Bestockungsgrade von 0,5–0,7. Nur eine Fläche im Thüringer Forstamt Oberhof war aufgrund eines erst kürzlich eingetretenen Borkenkäferbefalls mit 15 m<sup>2</sup>/ha ( $B^{\circ} = 0,3$ ) deutlich lichter gestellt. Die Buchenvoranbauten wiesen eine Alterspanne von 12–26 Jahren auf, sodass sich ihre Standzeit bis zur sturmbedingten Freistellung im Januar 2007 auf sechs bis 20 Jahre beläuft. Die Größe der einzelnen Verjüngungselemente variiert zwischen 0,7 ha und 5,5 ha. Anhand der Revierbücher und Vollzugsdatenbanken der Forstbetriebe sowie einer selbst vorgenommenen Rekonstruktion der Pflanzverbände wurden mittlere Pflanzenzahlen von 1.000–9.000 St./ha in den Buchenvoranbauten ermittelt, wobei innerhalb der Flächen erhebliche Variationen feststellbar waren. Die bezüglich des Untersuchungsfaktors Entwicklungsstadium retrospektiv durchgeführte Taxation ergab, dass im Jahr 2007 bereits 13 Voranbauten das Dickungsstadium erreicht hatten, von denen nun neun ohne Schirm sind. Die übrigen 16 Voranbauten, von denen acht einen zumindest partiellen Schirmverlust erlitten, befanden sich in dieser Phase folglich noch „vor Dickungsschluss“.

Erhebliche Schwierigkeiten bereitete die Recherche des verwendeten Pflanzenmaterials. Herkunftsgebiet und Sortiment der gepflanzten Buchen sind nur lückenhaft dokumentiert bzw. konnten infolge zwischenzeitlicher Änderungen der Forstadressen nicht mehr eindeutig den heutigen Teilflächen zugeordnet werden. Dennoch lagen für neun Flächen der Thüringer Modellregion entsprechende Daten vor. Hier wurden überwiegend die Herkünfte 81058 „Thüringer Wald und Schiefergebirge“, 81057 „West- und Südthüringen“ sowie 81055 „Südabfall des Harzes“ eingesetzt, welche ausnahmslos für dieses Gebiet zugelassen sind. Als Pflanzgut wurden vor allem zweijährige, unverschulte Sämlinge aus der Baumschule genutzt. Für die in Sachsen gelegenen Versuchsflächen konnte das Herkunftsgebiet der Buche in neun Fällen ermittelt werden. Es dominieren die Herkünfte 81017 „Württembergisch-Fränkisches Hügelland“ sowie 81006 „Harz, Höhenlage über 300 m“. Erstere ist für eine Verwendung im Sächsischen Erzgebirge nicht zugelassen (WOLF 2015). Zudem wurde Pflanzgut der früheren Herkunftsgebiete 81007 „Südhanover-Ostwestfälisch-Hessisches Bergland“ sowie 81016

„Ostbayerische Mittelgebirge, Höhenlage über 800 m“ eingesetzt. Diese waren nach der damaligen Gesetzeslage als Ersatzherkünfte anerkannt (WOLF 2015). Weiterhin kamen die gebietsheimischen Herkünfte 81015 „Erzgebirge mit Vorland, hochmontane Stufe“ sowie 81060 „Erzgebirge und Vogtland über 800 m“ vor. Zu beachten ist, dass sich die angegebenen Herkunftsbezeichnungen jeweils auf die zum Zeitpunkt des Voranbaus gültigen Verordnungen beziehen. Diese wurden in der Zwischenzeit mehrfach überarbeitet und stimmen somit nicht mehr zwingend mit den aktuellen Gebietsbezeichnungen überein.



**Tabelle 6:** Klimatische und standörtliche Charakterisierung der Versuchsflächen. Angaben zur Höhenlage nach digitalem Geländemodell, DGM 200 (GDZ 2015). Die Temperatur- und Niederschlagsangaben sind interpolierte Rasterdaten zur Normalperiode 1981–2010 (REKIS 2015b). Die Vegetationszeitlängen in Tagen pro Jahr beziehen sich für die Modellregion Thüringen auf die Periode 1971–2000 (TLWJF 2011). Für das sächsische Untersuchungsgebiet lagen Rasterdaten für die Klimaperiode 1981–2010 vor (REKIS 2015a).

Forstamt/ -bezirk	Fläche ID	Forstadresse	Koordinaten		(Teil-) Wuchsbezirk	Standort- formengruppe	Höhe [m ü. NN]	Jahresmittel- temperatur [°C]	Niederschlag [mm/a]	VZ-Länge [Tage/a]
			Nord	Ost						
Oberhof (Thüringen)	1	Benshausen 513a3	50° 37' 33"	10° 35' 40"	11.2.0	Vff TM2	530	7,2	939	140–165
	2	Dietzhausen 449a6	50° 34' 58"	10° 37' 18"	11.2.0	Vff TM3	580	6,8	1.031	140–165
	3	Dietzhausen 404a5	50° 33' 50"	10° 39' 23"	11.2.0	Mff TM3	675	6,7	1.048	140–165
	4	Heinrichs 307a3	50° 34' 45"	10° 40' 27"	11.2.0	Vff TM3	585	6,6	1.088	140–165
	5	Heinrichs 314b2	50° 34' 41"	10° 40' 31"	11.2.0	Vff TM2	575	6,6	1.088	140–165
Frauenwald (Thüringen)	6	Oehrenstock 1101a5	50° 38' 49"	10° 56' 10"	8.2.0	Mf TM2	670	6,5	1.113	140–165
	7	Tannengrund 417a5	50° 34' 14"	10° 54' 21"	8.2.1	Mff TM2	580	6,2	1.194	110–140
	8	Tannengrund 334a2	50° 33' 48"	10° 55' 26"	8.2.1	Mff TM2	710	6,3	1.183	110–140
Sonneberg (Thüringen)	9	Hasenthal 715a5	50° 27' 24"	11° 13' 54"	9.1.1	Mff TM2	580	6,6	1.020	140–165
	10	Neuenbau 633b13	50° 26' 45"	11° 15' 20"	9.1.1	Mff TM2	640	6,7	1.041	140–165
	11	Neuenbau 630a5 bis a8	50° 25' 57"	11° 15' 53"	9.1.1	Hff TM2	710	6,5	1.053	140–165
	12	Judenbach 518a4	50° 24' 58"	11° 15' 35"	9.1.1	Mff TM2	550	7,1	1.064	140–165
	13	Judenbach 507a9	50° 23' 17"	11° 14' 34"	9.1.1	Hff TM2	670	6,6	1.176	140–165
	14	Judenbach 507a3	50° 23' 55"	11° 14' 18"	9.1.1	Hff TM2	670	6,6	1.176	140–165
Bärenfels (Sachsen)	15	Hetzdorf 22b0	50° 57' 33"	13° 29' 15"	4507	Uf WM2z/NM2z	390	8,1	860	159
	16	Hetzdorf 22a3	50° 57' 34"	13° 29' 08"	4507	Uf WM2z/NM1	390	8,1	860	159
	17	Hetzdorf 23c1	50° 57' 40"	13° 28' 34"	4507	Uf WM2z/TM2	410	8,0	862	158
	18	Hetzdorf 321a1	50° 57' 39"	13° 29' 30"	4507	Uf WM2z/TM2	400	8,1	860	159
	19	Hetzdorf 340d1	50° 57' 45"	13° 30' 18"	4507	Uf TM2w	380	8,1	860	158
	20	Hetzdorf 524a8	50° 58' 44"	13° 29' 34"	4507	Uf TM2	330	8,5	800	165
	21	Hetzdorf 743b0	50° 57' 28"	13° 29' 22"	4507	Uf TM2w	410	8,1	860	158
	22	Oberfrauendorf 788a2	50° 50' 25"	13° 42' 41"	4506	Mf TM2	530	7,0	919	145
	23	Seyde 301a2	50° 46' 40"	13° 36' 29"	4503	Hf TM2	660	6,2	966	134
Chemnitz (Sachsen)	24	Zellwald 458a7	51° 02' 06"	13° 16' 05"	2605	Uf WM2z	270	8,8	720	170
	25	Zellwald 461a4	51° 01' 54"	13° 15' 05"	2605	Uf WM2z	300	8,7	754	167
Eibenstock (Sachsen)	26	Grünheide 44a0	50° 30' 15"	12° 28' 58"	4504	Mf TZ2	720	6,5	1.021	124
	27	Grünheide 45a1	50° 29' 60"	12° 29' 07"	4504	Mf TZ3/TM1	700	6,5	1.021	124
	28	Hundshübel 137c1	50° 32' 17"	12° 36' 58"	4504	Mf TZ2/TZ3	610	7,2	998	130
	29	Hundshübel 167a2	50° 31' 25"	12° 34' 18"	4504	Mf TZ3/TZ2	600	7,1	1.002	130

**Tabelle 7:** Charakterisierung der Bestockung auf den 29 Versuchsflächen im Jahr der Datenaufnahme 2012. Nur das Entwicklungsstadium (Dickungsschluss) ist auf den Zeitpunkt des Schirmverlusts bezogen. Für geworfene Fichtenschirme ist der Zustand vor KYRILL angegeben (Angaben in Klammern). Die Bestockungsangaben entstammen den Forsteinrichtungswerken (SACHSENFORST 2012; THÜRINGENFORST 2012). Höhe und Dickungsschluss der Voranbauten wurden eigenständig erfasst. Falls verfügbar, wurden Herkunftsgebiet und Pflanzensortiment den Vollzugsdaten entnommen (SACHSENFORST 2014; THÜRINGENFORST 2014). Gleiches gilt für die Pflanzenzahlen pro ha, welche nur bei mangelnder Datenlage eigenständig rekonstruiert wurde (Kennzeichnung \*).

Forstamt/ -bezirk	Fläche ID	Forstadresse	Fichtenschirm				Buchenvoranbau					
			Alter [a]	G [m <sup>2</sup> /ha]	B°	KYRILL	Alter [a]	Fläche [ha]	Stammzahl [St./ha]	Dickungs- schluss	Herkunft	Sortiment
Oberhof (Thüringen)	1	Benshausen 513a3	82	21	0,5	nein	16	2,00	4.000	vor	81057	2/0
	2	Dietzhausen 449a6	(111)	(24)	(0,5)	ja	17	0,67	2.000*	nach		
	3	Dietzhausen 404a5	88	21	0,5	ja/nein	22	4,21	6.000	nach		2/1
	4	Heinrichs 307a3	153	15	0,3	nein	17	1,31	5.000	vor	81058	2/0
	5	Heinrichs 314b2	(97)	(34)	(0,7)	ja	22	1,98	3.000*	nach	81058	2/0
Frauenwald (Thüringen)	6	Oehrenstock 1101a5	(114)	(31)	(0,6)	ja	13	1,63	2.600	nach		
	7	Tannengrund 417a5	108	35	0,7	nein	21	1,42	4.000	vor	81055	2/0
	8	Tannengrund 334a2	124	26	0,5	nein	26	2,32	1.000*	nach	81058	2/1
Sonneberg (Thüringen)	9	Hasenthal 715a5	78	27	0,5	nein	20	0,95	9.000	nach	81058	2/0
	10	Neuenbau 633b13	83	23	0,5	nein	15	0,78	5.000	vor	81058	2/0
	11	Neuenbau 630a5 bis a8	75	27	0,6	ja/nein	13	3,83	7.000*	vor		
	12	Judenbach 518a4	(92)	(29)	(0,6)	ja	19	0,53	7.000*	nach		
	13	Judenbach 507a9	85	34	0,7	ja/nein	15	1,69	5.000	vor	81058	2/0
	14	Judenbach 507a3	(108)	(26)	(0,6)	ja	17	1,08	6.000	vor	81058	2/0
Bärenfels (Sachsen)	15	Hetzdorf 22b0	(111)	(30)	(0,6)	ja	15	2,4	3.500	vor		
	16	Hetzdorf 22a3	(119)	(32)	(0,7)	ja	18	2,9	3.500	vor		
	17	Hetzdorf 23c1 bis d4	123	32	0,7	nein	15	0,7	4.000	vor		
	18	Hetzdorf 321a1	(107)	(27)	(0,7)	ja	15	4,1	2.000*	vor	81017	
	19	Hetzdorf 340d1	89	22	0,6	nein	18	2,4	5.000	nach	81017	
	20	Hetzdorf 524a8	111	35	0,8	nein	15	3,5	4.000	vor		
	21	Hetzdorf 743b0	112	30	0,7	nein	16	2,0	3.000	vor	81017	
	22	Oberfrauendorf 788a2	(82)	(35)	(0,8)	ja	12	0,8	3.500	vor	81016	
	23	Seyde 301a2	(121)	(29)	(0,7)	ja	20	1,5	4.000*	nach	81060	
Chemnitz (Sachsen)	24	Zellwald 458a7	(104)	(38)	(0,8)	ja	16	0,8	5.000	nach		
	25	Zellwald 461a4	k. A.			ja	14	1,4	7.000	nach	81007	
Eibenstock (Sachsen)	26	Grünheide 44a0	100	24	0,7	nein	16	2,3	6.500	nach	81006	
	27	Grünheide 45a1	63	24	0,6	ja/nein	14/17	5,5	6.000	vor	81006	
	28	Hundshübel 137c1	(83)	(25)	(0,6)	ja	15	3,7	2.600	nach	81015	
	29	Hundshübel 167a2	113	23	0,5	nein	15	3,0	5.000	vor		

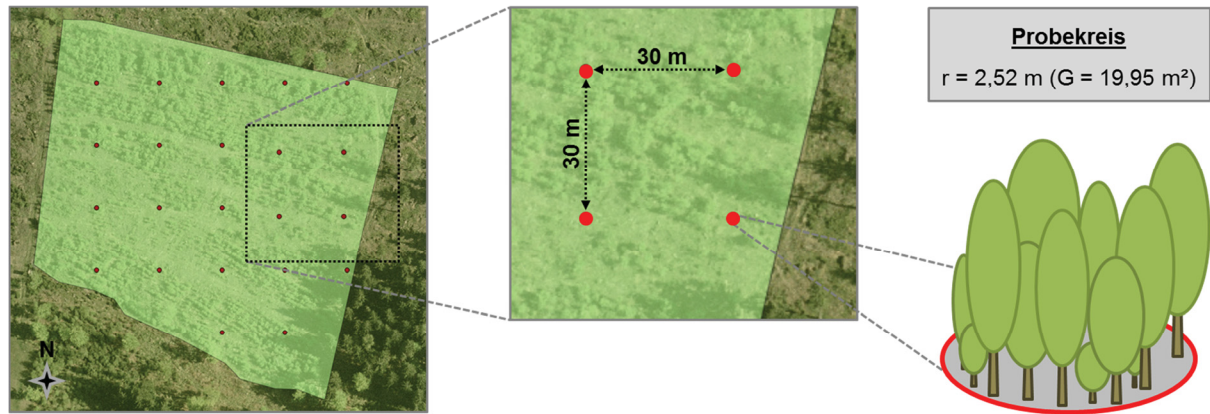
## **2.3 Datenaufnahme**

### **2.3.1 Etablierung der Versuchsanlage**

Das wesentliche Ziel bei der Etablierung der Versuchsanlage in den Flächen bestand darin, neben den Faktorstufen des Entwicklungsstadiums vor allem die Pflanzendichte möglichst präzise zu erfassen und differenziert abzubilden. Vor allem hinsichtlich der Pflanzenzahl musste deshalb eine Methodik gewählt werden, welche die starke Heterogenität innerhalb der einzelnen Verjüngungselemente ausreichend berücksichtigt. Darüber hinaus traten auch hinsichtlich der Beteiligung von Mischbaumarten und der Überschirmungssituation auf den Referenzflächen Ungleichmäßigkeiten auf, die es bei der Entwicklung des Versuchsdesigns zu beachten galt.

Aus den genannten Gründen fiel die Wahl auf ein rasterbasiertes Probekreisverfahren. Dabei diente ein quadratisches Gitternetz der Maschenweite 30 m x 30 m der systematischen und objektiven Verteilung der Aufnahmeeinheiten auf der Fläche. Die Schnittpunkte bildeten die Mittelpunkte der Probekreise mit einem Radius von 2,52 m, was einer Grundfläche von 19,95 m<sup>2</sup> entsprach. Probepunkte dieser Größe bediente sich bereits OTT (2001) bei der Bilanzierung von Buchenkulturen auf Windwurfflächen. Auch LEDER (1992) griff in Untersuchungen zur Entwicklung von Weichlaubhölzern auf ein Probekreisverfahren mit ähnlichen Rasterweiten und Plotgrößen zurück. Für die selbst vorgenommenen Untersuchungen lag der Vorteil des Vorgehens vor allem darin, dass die Verhältnisse innerhalb eines ca. 20 m<sup>2</sup> großen Plots im Vergleich zur Bestandesebene deutlich homogener sind. Dies betrifft insbesondere die Pflanzendichte, die als Indikator der intraspezifischen Konkurrenz im Voranbau herangezogen wird, was aber nur auf der Grundlage ihrer exakten Erfassung möglich ist.

Aufgrund der eingeschränkten Sicht und Bewegungsfreiheit innerhalb der Buchenvoranbauten sollte die Etablierung des Rasters im Gelände mittels GPS erfolgen. Zu diesem Zweck wurden die Flächen zunächst im GIS (Software QUANTUM GIS, Version 1.7.4) mit dem Raster überzogen. Hierzu wurden die digitale Forstgrundkarte sowie ein aktuelles Orthofoto genutzt. Die vertikale Ausrichtung der Rasterlinien erfolgte stets in Nord-Süd-Richtung und war somit unabhängig von der Lage der einzelnen Bestände (Abbildung 7). Da keine Informationen zur räumlichen Lage der Voranbauelemente innerhalb des Bestandes vorlagen, wurde das Gitternetz zunächst auf die gesamte Teilfläche angelegt. Im Gelände konnten die Bereiche ohne Buchenvoranbau dann ausgespart werden.



**Abbildung 7:** Beispielhafte Darstellung der GIS-gestützten Rasteranlage. Unter Verwendung der digitalen Forstgrundkarte und eines aktuellen Orthofotos wurde ein systematisches Raster der Maschenweite 30 m x 30 m über die ausgewählten Bestände gelegt.

In der Fläche diente ein GPS-Empfänger (Blumax GPS 4013), welcher über Bluetooth mit einem Feldrechner (Panasonic Toughbook CF19) verbunden war, zum Auffinden der Rasterpunkte. Der GPS-Empfänger wurde an einer Teleskopstange befestigt, um ihn in Bereichen mit ungenügendem GPS-Empfang über das Kronendach der Buchen hinauschieben zu können (Abbildung 8, links).



**Abbildung 8:** Einmessen des Rasters auf einer Untersuchungsfläche mittels GPS-Empfänger und Feldrechner (links). Die Rasterpunkte wurden mit Tonkinstäben vermarktet und nummeriert (Mitte). Alle im Probekreis liegenden Buchen wurden mit Forstmarkierfarbe gekennzeichnet und mit einer fortlaufenden Nummer versehen (rechts).

Nach dem Auffinden der Rasterschnittpunkte wurden diese mit einem Tonkinstab vermarktet und nummeriert. Der Stab bildete zugleich den Mittelpunkt des Probekreises. Zum Einmessen der Probepunkte selbst wurde eine Maurerschnur in Länge des Probekreisradius ( $r = 2,52 \text{ m}$ ) am Tonkinstab befestigt. Daraufhin konnten damit alle innerhalb des Kreises befindlichen Buchen markiert und gezählt werden. Ein Baum gehörte unter der Voraussetzung zum Probekreis, dass die Markröhre am Stammfuß innerhalb des Radius lag. Jeder zum Plot zählende Baum wurde mit Forstmarkierfarbe und einem nummerierten Schlaufenetikett



gekennzeichnet (Abbildung 8, Mitte und rechts). Durch Multiplikation mit dem Faktor 500 wurde die im Probekreis ermittelte Pflanzenzahl auf die Bezugseinheit eines Hektars umgerechnet. Diese plotspezifische Pflanzendichte bildete die Basis der konkurrenzabhängigen Qualitätsanalyse.

Da auch innerhalb eines Voranbauelements nicht jeder Rasterpunkt für die Untersuchung geeignet war, wurden Auswahlkriterien festgelegt, welche zur Steigerung der Repräsentativität und Vergleichbarkeit aller Plots beitragen sollten:

- Um unerwünschte Randeffekte zu vermeiden, die statistisch gesehen als „Störgrößen“ einzustufen sind (BORTZ 1993), wurde vom Rand der Verjüngungselemente ein Mindestabstand von 3 m eingehalten. Dieser Ansatz geht auf die Untersuchungen von MATTHES (1997) sowie TIEBEL (2014) zurück, denen zufolge sich das Auftreten schlecht geformter Buchen in den äußeren 3 m von Laubholzeinheiten häuft. Auch LEONHARDT (2005) schloss die ersten beiden Reihen am Rand des Voranbauelements von ihren Untersuchungen aus. In gleicher Weise wurde mit Rückegassen oder größeren Ausfallbereichen innerhalb eines Voranbauelements umgegangen.
- Bei der Auswahl der Probepunkte auf den KYRILL-Flächen wurde vom benachbarten Altbestand ein Mindestabstand von einer bis 1,5 Altbaumlängen eingehalten. Dies begründet sich in den vom Altholz ausgehenden Effekten, welche zu einer Milderung der Freiflächenbedingungen im Bereich des Waldaußensaums führen (KNOERZER 2004; RÖHRIG ET AL. 2006).
- Auf einigen KYRILL-Flächen befanden sich noch Restvorräte des geworfenen Fichtenschirms. Probepunkte, die innerhalb der vertikalen Kronenprojektionsfläche dieser Altbäume lagen, wurden von der Untersuchung ausgeschlossen. Obwohl es sich zumeist um Einzelbäume handelte, sind Konkurrenzeffekte wahrscheinlich (vgl. WU ET AL. 1985).
- Plots mit konkurrierender, das heißt die vorangebaute Buche in ihrem Wachstum beeinflussender Fichtennaturverjüngung wurden nicht berücksichtigt. Dies war der Fall, wenn die Fichte mehr als einzelbaumweise auf einem Plot auftrat und ihre Höhe  $\geq \frac{2}{3}$  der Buchenhöhe war. Dagegen konnte das Auftreten einer deutlich kleineren, unterdrückten Fichtennaturverjüngung auch in größerem Umfang hingenommen werden.

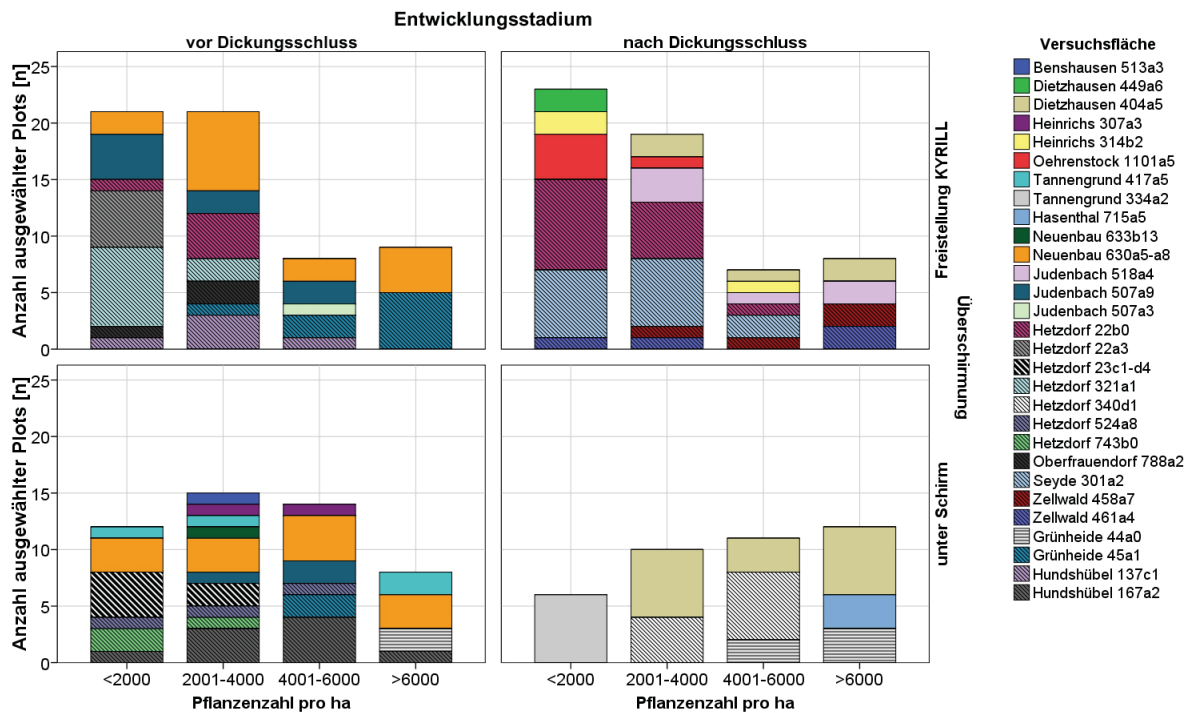
- Auch von Weichlaubhölzern können erhebliche Konkurrenzeffekte auf die Buchen ausgehen (PETERSEN & WAGNER 1999; AMMER ET AL. 2005). Diese wurden darum nur toleriert, solange sie maximal mitherrschend waren und als Einzelbäume auftraten. Vorherrschende, das heißt die Buchen überragende Individuen führten zum Ausschluss der betreffenden Plots.
- Waren am herrschenden Kollektiv des Buchenvoranbaus starke mechanische Schäden wie Sprossachsenknicke, Kronenbrüche, großflächige Rindenabschürfungen oder sonstige schwerwiegende qualitäts- und wachstumsbeeinflussende Beeinträchtigungen zu erkennen, blieben diese Plots außen vor. Gleiches gilt für Schälschäden durch Rotwild.
- Bei den Referenzflächen ist trotz der restriktiven Auswahl von einer räumlichen Heterogenität des Überschirmungsgrads innerhalb der Bestände auszugehen. So variiert der Kronenschluss von Waldbeständen naturgemäß sehr kleinräumig, was direkten Einfluss auf die Ressourcenversorgung der darunter befindlichen Verjüngungsschicht hat (PUKKALA ET AL. 1993; OTTO 1994; BRESHEARS ET AL. 1997; MARTENS ET AL. 2000). Um hinsichtlich der Überschirmungsintensität die Vergleichbarkeit aller Referenzplots zu gewährleisten, wurde der Kronenschluss unmittelbar über jedem Plot gutachterlich beurteilt. Als guter Kompromiss zwischen raschem Wachstum und bestmöglicher Qualifizierung der Buchenvoranbauten wird ein lockerer bis lichter Kronenschluss empfohlen (WEIHS & KLAENE 2000; HERTRAMPF 2009). Dieser liegt vor, wenn die Buchen gering überschirmt sind (Überschirmungsgrad von 40–50 %), das heißt, Lücken im Kronendach von maximal einer Kronenbreite auftreten (LEONHARDT 2005; SACHSENFORST 2011a). Alle davon abweichenden Plots wurden nicht mit einbezogen.

Unter Berücksichtigung dieser Kriterien wurde das Raster auf den Flächen etabliert und die Plots hinsichtlich ihrer Eignung geprüft und ausgewählt. Aufgrund der heterogenen Bestandesbedingungen mussten zahlreiche Punkte verworfen werden. Ursächlich hierfür war zumeist die Nähe zu Rückegassen, Bestandesrändern oder Wegen. Insgesamt standen nach Anlage des 30 m x 30 m umfassenden Rasters 141 Plots für die Untersuchung zur Verfügung.

Dieser Stichprobenumfang entsprach noch nicht den Anforderungen an eine statistisch belastbare Datengrundlage. Vor allem die Voranbauten mit hoher Stammzahldichte waren deutlich unterrepräsentiert, weshalb auf ausgewählten Flächen eine Verdichtung des



Gitternetzes auf 20 m x 20 m vorgenommen wurde. Diese konzentrierte sich gezielt auf Flächen, welche bereits Probepunkte der bisher ungenügend besetzten Versuchsvarianten aufwiesen. Dies betraf die Flächen 3, 7, 11, 12 und 13 in Thüringen sowie 15, 19 und 23 in Sachsen. Im Ergebnis konnten weitere 63 Plots für die Untersuchung gewonnen werden. Insgesamt erfolgte die Datenaufnahme somit an 204 Probepunkten, von denen 93 in Thüringen und 111 in Sachsen liegen (Abbildung 9).



**Abbildung 9:** Übersicht über die Verteilung der ausgewählten Probepunkte auf die 29 Versuchsflächen in Abhängigkeit von der Pflanzenzahl pro Hektar. Die Darstellung erfolgt getrennt nach den Untersuchungsfaktoren „freigestellte Voranbauten“ (obere Zeile) und „Referenzflächen“ (untere Zeile). Zudem sind Flächen vor Dickungsschluss (linke Spalte) und nach Dickungsschluss (rechte Spalte) separiert. Die schraffierten Balken kennzeichnen die Modellregion „Sächsisches Erzgebirge und Vorland“.

Hinsichtlich der Repräsentativität dieser Stichprobe ist anzumerken, dass in beiden Modellregionen nahezu alle möglichen Faktorstufenkombinationen von Überschirmung, Entwicklungsstadium und Pflanzendichte auftreten. Eine Ausnahme bilden nur die stammzahlärmsten Voranbauten im Dickungsschluss, welche unter Schirm nur in Thüringen vorkommen.

### 2.3.2 Grundlagen der Datenaufnahme

Die in der Untersuchung erhobenen Daten können in drei thematische Bereiche unterteilt werden, an denen sich auch die Gliederung des Hauptteils dieser Arbeit orientiert:

- *Wachstum und Zuwachsreaktion vorangebauter Buchen nach sturmbedingtem Schirmverlust (Kapitel 3, S. 54 ff.)*

- Erfassung von Höhe und jährlichem Längenwachstum
- Erfassung von Durchmesser sowie Radialzuwachs an Stamm und Ästen mittels Jahrringanalyse
- *Astigkeit und Astreinigung vorangebauter Buchen nach sturmbedingtem Schirmverlust (Kapitel 4, S. 87 ff.)*
  - Erhebung qualitätsrelevanter Astmerkmale nach dem Verfahren des DEUTSCHEN VERBANDES FORSTLICHER FORSCHUNGSANSTALTEN, Sektion Waldbau (vgl. BÖRNER ET AL. 2003)
- *Kronenmorphologie, Qualität und Häufigkeit von Z-BaumAnwärtern in sturmbedingt freigestellten Buchenvoranbauten (Kapitel 5, S. 109 ff.)*
  - Untersuchung der Kronenmorphologie der Buchen anhand qualitätsrelevanter Verzweigungsmerkmale wie Steilläste und Zwiesel
  - gesamthafte, gutachterliche Qualitätsansprache anhand von Schaft- und Kronenform
  - Quantifizierung von Z-Baum-Anwärtern unter den verschiedenen Bestandesbedingungen

Auf die jeweilige Aufnahmemethodik und deren Umsetzung wird in den entsprechenden Kapiteln näher eingegangen. An dieser Stelle werden darum nur die Grundlagen der Datenaufnahme erläutert.

Die Spannweite der Pflanzenzahlen pro Plot reichte von einer bis 24 Buchen. Insbesondere in den stammzahlreichen Probekreisen im Dickungsstadium hat bereits eine starke soziologische Differenzierung eingesetzt. Eine Vollaufnahme, die somit auch Buchen der unteren soziologischen Klassen einschließt, erscheint für die Untersuchung des Qualitätspotenzials des zukünftigen Bestandes nicht sinnvoll. Aus diesem Grund musste eine Methode gefunden werden, welche die Datenerhebung stets auf die vorherrschenden und herrschenden Bestandesglieder eines Probekreises beschränkte. Zu diesem Zweck wurde das Aufnahmekollektiv auf maximal sechs Buchen je Probekreis begrenzt. Deren Auswahl orientierte sich ausschließlich an der Baumhöhe zum Aufnahmezeitpunkt als Maß der soziologischen Stellung. Befanden sich also mehr als sechs Buchen auf einem Plot, wurden nur diejenigen mit der größten Höhe erfasst. Diese in Relation zum übrigen Bestand wüchsigsten Individuen sind hinsichtlich ihrer Vitalität die für die Wertholzproduktion potenziell interessanten Zukunftsbäume (LEIBUNDGUT 1978; SPELLMANN & DIEST 1990;

GOCKEL 1994; WILHELM ET AL. 1999c; SPIECKER 2007). Folglich erscheint eine Konzentration der Qualitätsansprache auf dieses Kollektiv sinnvoll.

Nach diesem Verfahren wurden auf den 204 Plots insgesamt 895 Buchen ausgewählt. Davon entfallen 447 Individuen auf die Modellregion Thüringer Wald, weitere 448 Buchen wurden im sächsischen Teil des Untersuchungsgebiets ausgewählt. Die Feldaufnahmen begannen im September 2012, sodass seit dem sturmbedingten Schirmverlust sechs Vegetationsperioden vergangen waren.

Die meisten Buchen wiesen bei der Datenaufnahme bereits Höhen von deutlich über 4 m auf. Folglich konnten vom Boden aus, namentlich in den oberen Kronenbereichen, nicht alle Parameter erfasst werden. In den jüngeren, stammzahlreichen Voranbauten waren die Buchen meist noch so schlank, dass sie für die Messungen vorsichtig herabgebogen werden konnten, ohne dabei Schaden zu nehmen. Bei älteren, stärker dimensionierten Voranbauten war dies nicht ohne Weiteres möglich. Hier wurde eine ausziehbare Alukombileiter verwendet. Waren die Buchen ausreichend stabil, konnte diese möglichst steil an die zu messenden Bäume gelehnt und mit einem Spanngurt daran befestigt werden (Abbildung 10).



**Abbildung 10:** Eine Alukombileiter diente bei der Datenaufnahme als Hilfsmittel zur besseren Erreichbarkeit der oberen Kronenbereiche. Diese konnte als Stand- oder Anlegeleiter eingesetzt werden (links bzw. Mitte). Bei gegebener Stabilität wurde die Leiter steil an den Baum gestellt und mit einem Spanngurt daran befestigt (rechts).

## **2.4 Mathematisch-statistische Auswertung**

### **2.4.1 Grundlagen der statistischen Auswertung**

Die in der vorliegenden Arbeit durchgeführte Datenanalyse basiert auf dem Ansatz der statistischen Modellbildung. Das Wesen der Modellbildung besteht darin, die Eigenschaften

einer Zielgröße (Response-Variable) durch eine Funktion aus einer oder mehreren erklärenden Variablen, hier Schirm, Entwicklungsstadium und Pflanzenzahl, abzubilden (HEDDERICH & SACHS 2012). Im vorliegenden Fall wurden auch eventuell zwischen den erklärenden Variablen bestehende Interaktionseffekte (Wechselwirkungen) berücksichtigt.

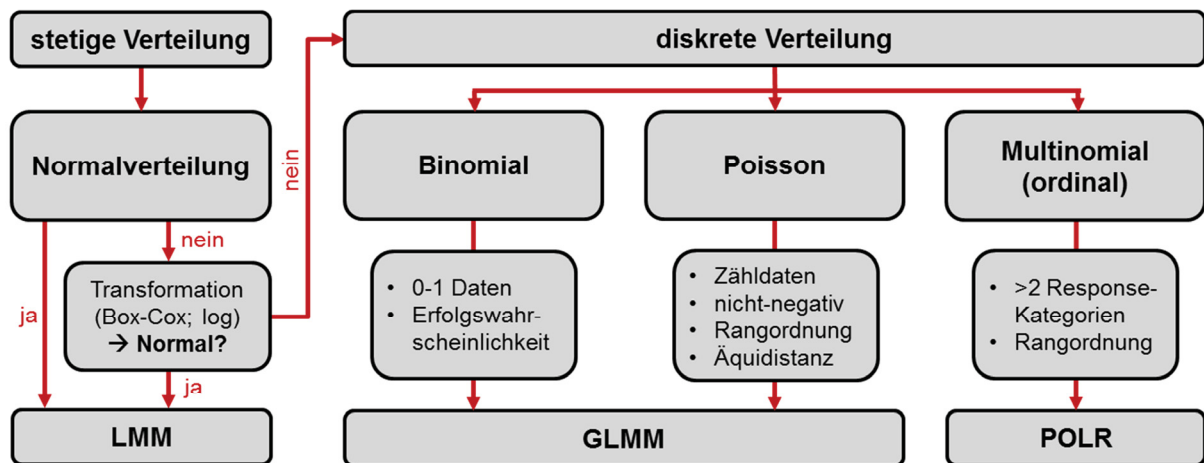
Die besondere Herausforderung bei der Auswertung des vorliegenden Versuchs bestand in der räumlich geschachtelten Versuchsanlage, die auch als „nested design“ bezeichnet wird. Hierbei finden innerhalb einer Behandlungseinheit mehrere Messungen parallel oder zeitlich wiederholt statt (DORMANN 2012). Das räumliche Nesting wird in dieser Untersuchung durch die folgende hierarchische Schachtelung der Versuchsanlage abgebildet: Plot in Versuchsfläche, in Revier, in Forstbetrieb, in Modellregion. Mit Blick auf die von HURLBERT (1984) beschriebene Problematik der Pseudoreplikation stellten vor allem die wiederholten Messungen innerhalb einer Versuchsfläche ein Problem dar. Zwar wurden die Einzelbaumdaten vor der Auswertung auf Plotebene aggregiert, und aufgrund des Rasterdesigns war auch nicht von einer gegenseitigen Beeinflussung der Probepunkte einer Fläche auszugehen. Die Ähnlichkeit der Umgebung stellt jedoch eine wesentliche Einflussgröße dar, die sich gegebenenfalls in der Ausprägung der untersuchten Größen niederschlägt, sodass die Plotwerte einer Fläche nicht als unabhängige Wiederholungen zu betrachten sind. Dies gilt namentlich vor dem Hintergrund varianzanalytischer Verfahren, welche ausdrücklich unkorrelierte Messwertfehler der einzelnen Stichproben innerhalb einer Faktorstufenkombination (Gruppe) voraussetzen. Bei Messwiederholungen an einem Probanden oder räumlich nahen Probanden ist diese Annahme möglicherweise nicht erfüllt (HURLBERT 1984). Somit ist das Auftreten systematisch korrelierter Messwertfehler auch in der vorliegenden Versuchsanlage nicht ausgeschlossen (VENABLES & RIPLEY 2002; DORMANN 2012).

Aus den geschilderten Gründen wurden für die statistische Auswertung *gemischte Modelle* („Mixed Models“) verwendet, welche neben festen auch zufällige Effekte berücksichtigen. Für die festen Effekte wird ein Zusammenhang mit der Response-Variable erwartet, welcher in der Untersuchung von primärem Interesse ist. Die zufälligen Effekte interessieren hingegen nicht unmittelbar, sind bei derartigen Experimenten in der statistischen Modellbildung aber dennoch zu berücksichtigen. Ihnen wird eine Varianzkomponente in Form ihres individuellen Anteils an der Gesamtstreuung zugewiesen (DORMANN 2012). Die Verfahren der gemischten Modelle sind folglich in der Lage, geschachtelte Versuchsanlagen mit damit einhergehenden inhomogenen Varianzstrukturen abzubilden. Außerdem nutzen sie gegebenenfalls spezifische



Korrelationsstrukturen, um korrelierte Messwertfehler zwischen den Probanden einer Gruppe zu berücksichtigen (PINHEIRO & BATES 2000; VENABLES & RIPLEY 2002; FARAWAY 2006).

Die Wahl des geeigneten Modellansatzes hängt im Wesentlichen vom Skalenniveau und vom Verteilungstyp der Response-Variable ab (ZUUR ET AL. 2009; HEDDERICH & SACHS 2012). Abbildung 11 gibt einen Überblick über die in dieser Arbeit auftretenden Verteilungstypen und die dementsprechend gewählten Modellansätze.



**Abbildung 11:** Entscheidungsbaum zur Wahl des geeigneten statistischen Modellansatzes. Die Darstellung berücksichtigt nur für diese Arbeit relevante Verteilungsarten und Modellansätze.

Regressionsanalytischen Verfahren wie linearen gemischten Modellen (LMM) und generalisierten linearen gemischten Modellen (GLMM) liegen einige Annahmen zugrunde, welche im Voraus zu prüfen sowie gegebenenfalls zu korrigieren sind (ZUUR ET AL. 2009; HEDDERICH & SACHS 2012):

- a) Die Zuordnung zwischen abhängiger Zielgröße  $Y$  und unabhängiger Einflussgröße  $X$  kann inhaltlich begründet werden, sodass gilt:  $y = f(x)$ .
- b) Zwischen unabhängiger und abhängiger Größe besteht tatsächlich ein linearer Zusammenhang, welcher anhand des Verlaufs der beobachteten Punktwolke offenkundig wird.
- c) Die Streuung der  $Y$ -Werte ist nahezu konstant und vor allem unabhängig von den  $X$ -Werten (Homoskedastizität).
- d) Die Residuen sind normalverteilt mit dem Erwartungswert 0.
- e) Die Wertepaare  $(x_i, y_i)$  sind voneinander unabhängige Beobachtungen. Somit sind auch deren Residuen  $\varepsilon_i$  und  $\varepsilon_j$  für  $i \neq j$  unabhängig. Stellen die Beobachtungen eine Zeitreihe dar, sind sie nicht mehr unabhängig voneinander.

Diese Voraussetzungen wurden während des Prozesses der Modellbildung grafisch sowie mithilfe statistischer Tests überprüft und falls nötig korrigiert. Auf die jeweiligen Methoden wird an entsprechender Stelle eingegangen.

An dieser Stelle sei nochmals ausdrücklich darauf hingewiesen, dass alle Daten vor der statistischen Auswertung auf Plotebene aggregiert wurden. Dies geschah meist durch Mittelwertbildung, nur bei Zähldaten wurde der Median verwendet. Verantwortlich dafür ist die wechselseitige Beeinflussung direkt benachbarter Individuen eines Buchenvoranbaus, die bedingt, dass diese nicht als unabhängige Replikate zu betrachten sind. Für die statistische Auswertung stellt somit nicht der Einzelbaum, sondern der Plot die Wiederholung dar.

Für alle angewendeten Testverfahren gilt ein Signifikanzniveau von  $p \leq 0,05$ . In Abhängigkeit von der Irrtumswahrscheinlichkeit erfolgte eine zusätzliche Differenzierung der Signifikanzen (Tabelle 8).

**Tabelle 8:** Einteilung der Signifikanzniveaus bei statistischen Tests nach KÖHLER ET AL. (2002).

Signifikanzniveau (p)	Kennzeichnung	verbale Interpretation
$\leq 0,001$	***	höchst signifikant
$\leq 0,01$	**	hoch signifikant
$\leq 0,05$	*	signifikant
$> 0,05$		nicht signifikant

#### 2.4.2 Verfahrensschritte für lineare gemischte Modelle

Die Modellbildung erfolgt als iterativer Prozess, der grundsätzlich darauf ausgerichtet ist, ein möglichst einfaches geeignetes Verfahren zu finden. Ausschlaggebendes Kriterium für die Güte eines Modells ist weniger dessen Komplexität als vielmehr die korrekte Anwendung des gewählten Ansatzes (FARAWAY 2006; ZUUR ET AL. 2009).

Folgende Schritte kennzeichnen die bei *linearen gemischten Modellen* angewendete Prozedur (vgl. HAMM ET AL. 2014; WEIDIG ET AL. 2014):

- a) Die Prüfung auf Normalverteilung der Response-Variable erfolgte grafisch anhand von QQ-Plots sowie mittels SHAPIRO-WILK-Test. QQ-Plots stellen die beobachteten Werte den bei Vorliegen einer Normalverteilung zu erwartenden Werten gegenüber. Streuen die Punkte zufällig und eng um die QQ-Linie im Diagramm, darf die Normalverteilung angenommen werden. Der SHAPIRO-WILK-Test prüft die Nullhypothese ( $H_0$ ), die besagt, dass die Beobachtungen der Zufallsstichprobe einer normalverteilten Zufallsvariable zugeordnet werden können (HEDDERICH & SACHS 2012). Ist das Testergebnis signifikant ( $p \leq 0,05$ ), sind



die Daten nicht normalverteilt (JANSSEN & LAATZ 2007). Grundsätzlich ist grafischen Verfahren (QQ-Plots) Vorrang zu gewähren, da der SHAPIRO-WILK-Test die Normalverteilung oft schon bei unbedeutenden Abweichungen ablehnt (THIELE & MARKUSSEN 2012).

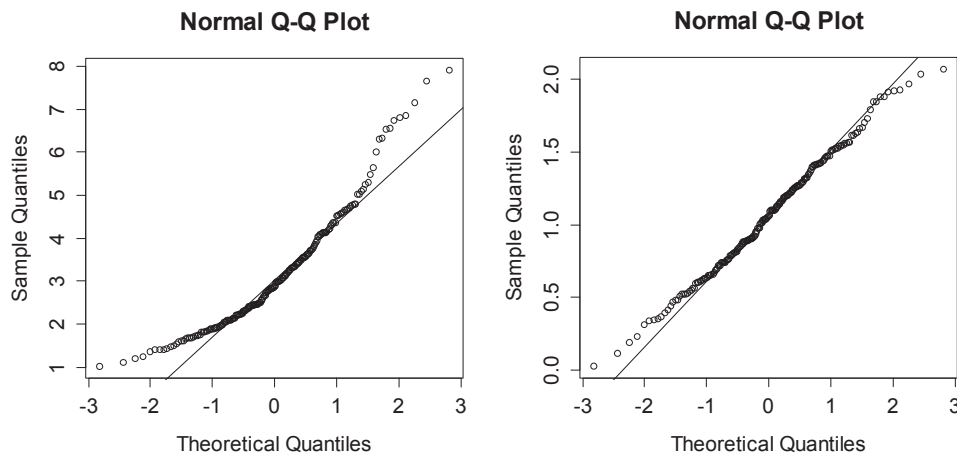
Derartige Abweichungen von der Normalverteilung offenbarten sich nicht selten, was mit Blick auf die Anwendungsvoraussetzungen der statistischen Methode gemischter Modelle aber nicht zwangsläufig kritisch zu betrachten ist (FITZMAURICE ET AL. 2011). Vor allem bei großen Stichprobenumfängen können die Modellergebnisse trotz mangelnder Normalverteilung angenommen werden (FARAWAY 2006). Bedeutender ist hingegen die Normalität der Modellresiduen. Dementsprechend wurde die Prozedur zunächst einmal komplett durchgeführt und anschließend die Verteilung der Residuen im QQ-Plot betrachtet (FARAWAY 2006; ZUUR ET AL. 2009). Nur unter der Voraussetzung, dass diese erheblich von der Normalverteilung abwichen, wurde eine Transformation der Response-Variable ( $y$ ) vorgenommen und die Prozedur wiederholt (FARAWAY 2006). Zur Transformation wurden zwei Verfahren angewendet:

- Logarithmustransformation:  $\tilde{y} = \ln y$ , wobei  $y > 0$  (1)

- Box-Cox-Transformation:  $T_{\lambda}(x) = \frac{e^{\lambda}-1}{\lambda}$ , für  $\lambda \neq 0$  (2)

$$T_0(x) = \log x, \quad \text{für } \lambda = 0 \quad (3)$$

Zur empirischen Bestimmung des geeigneten Werts für  $\lambda$  im Zuge der Box-Cox-Transformation (Formel 3) können QQ-Plots dienen. Dabei wird für einen definierten Wertebereich (hier  $\lambda \in [-5, +3]$ ) das  $\lambda$  gewählt, welches in der Transformation zu einem möglichst hohen Korrelationskoeffizienten (nahe +1) zwischen transformierten Daten und der Standardnormalverteilung im QQ-Plot führt (HEDDERICH & SACHS 2012). In R kann diese Prozedur mithilfe der Funktion „bcplot()“ gelöst werden. Die Box-Cox-Transformation kam stets dann zum Einsatz, wenn durch die einfachere Logarithmustransformation keine (annähernde) Normalverteilung zu erzielen war (Abbildung 12).



**Abbildung 12:** QQ-Plot am Beispiel des Grünastdurchmessers der Buchen. Die beobachteten Werte waren nicht normalverteilt (links), was durch eine Logarithmustransformation korrigiert werden konnte (rechts).

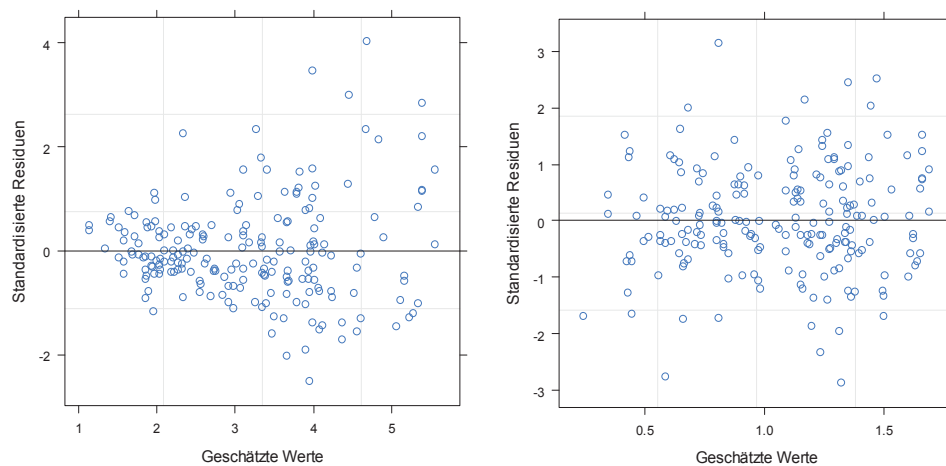
- b) Der mehrfach hierarchischen Schachtelung der Versuchsanlage wurde durch die Etablierung eines Zufallsterms in der Modellkonstruktion Rechnung getragen. Dabei treten Schirm, Entwicklungsstadium und Pflanzenzahl (Kovariate) als feste Effekte im Modell auf. Fläche, Revier, Forstbetrieb und Region sind als zufällige Effekte verschlüsselt. Zugleich kann in der Modellstruktur festgelegt werden, ob lediglich zugeordnete Einzeleffekte der erklärenden Variable Beachtung finden oder auch gegebenenfalls zwischen diesen bestehende Wechselwirkungen.
- c) Die Abbildung der verschiedenen Wachstums- und Qualitätsparameter der Buchen erfolgte durch eine lineare Beziehung aus Konstante (Intercept), Schirm (Faktor), Pflanzenzahl (Kovariate) und Entwicklungsstadium (Faktor). Entsprechend lautet die allgemeine Modellgleichung:

$$\begin{aligned} \text{Qualität}_{ijklmno} = & (\beta_0) \text{Intercept} + (\beta_{1,i}) \text{Schirm} + (\beta_2) \text{Pflanzenzahl} + (\beta_{3,j}) \text{Stadium} + \\ & (b_{4,k}) \text{Region} + (b_{5,l}) \text{Forstbetrieb} + (b_{6,m}) \text{Revier} + (b_{7,n}) \text{Fläche} + \varepsilon_{ijklmno} \end{aligned} \quad (4)$$

Dabei gibt  $\beta_{0-3}$  die Modellkoeffizienten der festen Effekte an, während  $b_{4-7}$  die zufälligen Effekte bezeichnet.  $\varepsilon$  stellt den Modellfehler dar. Die Indizes  $(i - j)$  stehen für die Faktorstufen von Schirm und Entwicklungsstadium,  $(k - n)$  für jene der Zufallseffekte und  $(o)$  für die Einzelwerte auf Plotebene.

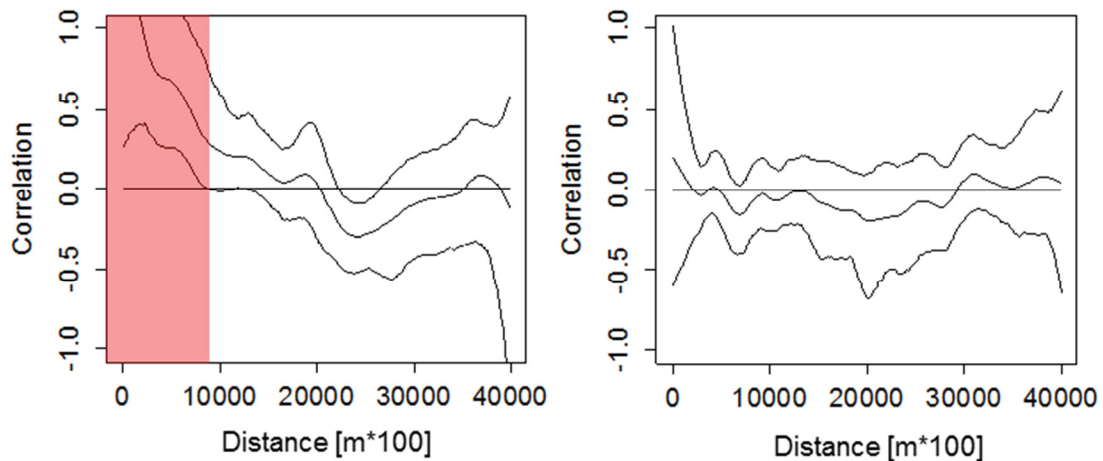
- d) Das Anfangsmodell unterstellt Homoskedastizität und räumliche Unabhängigkeit der Fehler.
- e) Die Prüfung der Varianzhomogenität erfolgte über eine Darstellung der standardisierten Residuen gegenüber der Modellschätzung. Ist die Streuung der Residuen dabei nahezu

konstant und vor allem unabhängig vom geschätzten  $X$ -Wert, kann Homoskedastizität angenommen werden (ZUUR ET AL. 2009). Nahm die Streubreite mit steigendem  $X$  zu („Trompetenform“ der Punktwolke), wurde dies über eine exponentielle Varianzstrukturfunktion gewichtet (vgl. PINHEIRO & BATES 2000), um der Homogenitätsannahme Folge leisten zu können. In R wird dies über die Funktion „weights = varPower()“ gelöst (Abbildung 13).



**Abbildung 13:** Prüfung der Homoskedastizität anhand einer Abbildung der standardisierten Residuen gegenüber der Modellschätzung. Steigt die Streuung der Werte mit zunehmendem  $X$ -Wert („Trompetenform“ der Punktwolke), liegt Heteroskedastizität vor (links). Dies konnte mithilfe einer Varianzstrukturfunktion behoben werden (rechts).

- f) Zur Prüfung der Unabhängigkeit der Modellfehler von der räumlichen Distanz zwischen den Plots dienten Korrelogramme und Semivariogramme. Voraussetzung für diese Prozedur ist das Vorliegen der kartesischen Koordinaten jedes Plots, um den euklidischen Abstand zu jedem anderen Plot innerhalb der Fläche berechnen zu können. Weisen die Modellfehler näher beieinander liegender Probekreise eine größere Ähnlichkeit auf als die weiter voneinander entfernter Plots, ist dies als Indiz für eine räumliche Autokorrelation zu werten. Korrelogramme bilden die Autokorrelation der Modellresiduen inklusive des 95 %-Konfidenzintervalls über die Distanz ab und zeigen auf, bis zu welcher Entfernung möglicherweise eine signifikante Abhängigkeit auftritt (ZUUR ET AL. 2009). Gegebenenfalls wurde dies durch spezielle Korrelationsfunktionen zur Modellierung der räumlichen Abhängigkeit berücksichtigt (Abbildung 14). In R geschieht das über die Funktionen „corr = corrGaus“ (GAUß'sche Korrelationsstruktur) bzw. „corr = corExp“ (exponentielle Korrelationsfunktion) (PINHEIRO & BATES 2000).



**Abbildung 14:** Korrelogramme bilden die Ähnlichkeit der Modellresiduen über die räumliche Distanz ab. Eine positive Korrelation – wie sie im linken Diagramm bis zur Distanz von ca. 90 m deutlich zu erkennen ist – ist ein Indikator für eine räumliche Autokorrelation. Die Darstellungen zeigen die Korrelation sowie die dazugehörigen 95 %-Konfidenzintervalle. Nur wenn die Konfidenzintervallgrenzen die Nulllinie schneiden, liegt eine signifikante räumliche Autokorrelation vor. Diese wurde durch entsprechende Korrelationsfunktionen berücksichtigt (rechts).

- g) Dieses Vorgehen erfolgte schrittweise, wobei nach jeder Modellanpassung ein varianzanalytischer Vergleich (ANOVA) des ursprünglichen mit dem angepassten Modell durchgeführt wurde. Die Prozedur wurde dann mit dem jeweils besseren Modell fortgesetzt. Als Maß der Güte eines Modells dienten neben dem Signifikanzwert des ANOVA auch das AKAIKE-Informationskriterium (AIC) sowie die Log-Likelihood-Statistik (logLik).

Die Log-Likelihood-Statistik beruht auf der Maximum Likelihood Estimation (MLE) zur optimalen Schätzung unbekannter Parameter. Ist der Verteilungstyp einer Variable bekannt, schätzt die Methode für alle unbekannten Parameter des Modells diejenigen Werte, welche dem vorliegenden Stichprobenergebnis die größte Wahrscheinlichkeit des Auftretens (Maximum Likelihood) verleihen (HEDDERICH & SACHS 2012). Da es meist einfacher ist, das Maximum der logarithmierten Likelihood-Funktion zu bestimmen, wird auch im gemischten Modell auf die Log-Likelihood-Statistik (logLik) zurückgegriffen (FARAWAY 2006). Je größer der logLik-Wert eines Modells ist, desto besser ist seine Vorhersagegenauigkeit.

Die Grundidee des Informationskriteriums AIC erweitert diesen Ansatz um den Gedanken, dass ein statistisches Modell nicht komplexer sein sollte als unbedingt nötig (HEDDERICH & SACHS 2012). Deshalb werden seine Anpassungsgüte an die empirischen Daten und seine Komplexität, gemessen an der Anzahl der einbezogenen Parameter, ausbalanciert. Die Anzahl der Parameter wird dabei „strafend“ berücksichtigt, da komplexere Modelle sonst grundsätzlich bevorzugt würden. Das AIC gehört zu den

Algorithmen, die eine adäquate Beschreibung der beobachteten Daten durch ein Modell mit möglichst wenigen, aber elementar bedeutsamen Parametern strebt. Es sorgt somit für eine ausgewogene Balance zwischen einer Vernachlässigung wichtiger Modelleffekte („Underfit“) sowie einer Modellüberfrachtung („Overfit“), was zu Pseudoeffekten oder Artefakten führen kann. Ziel der Modellbildung ist es, ein möglichst geringes AIC zu erhalten (PINHEIRO & BATES 2000; HEDDERICH & SACHS 2012), was wiederum Ausdruck einer minimalen Varianz der Residuen ist.

- h) Grundsätzlich wurde zunächst die gesamte Schachtelung der Versuchsanlage im Zufallsterm dargestellt. Im Zuge der Güteprüfung wurden Faktoren, die nur einen unwesentlichen Beitrag zur Erklärung der Streuung leisteten, anschließend aus dem Modell entfernt, um dieses möglichst unkompliziert zu gestalten. Hierfür wurde ein Grenzwert der Standardabweichung von  $SD = 0,1$  für das „Random Intercept“ festgelegt.

Waren Wechselwirkungen zwischen festen Effekten zu erwarten, wurden ebenfalls solche Modelle entwickelt. Im Zuge eines varianzanalytischen Vergleichs konnte dann das Modell mit der jeweils höchsten Anpassungsgüte bestimmt werden.

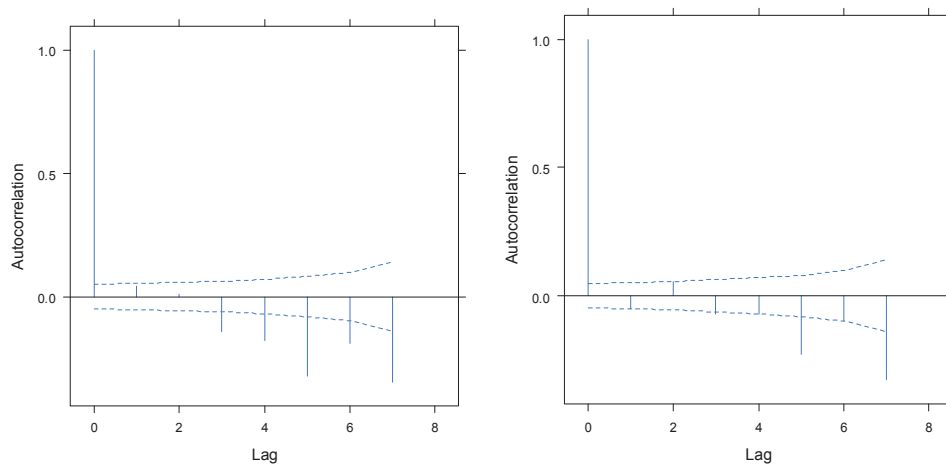
Für alle angewendeten Tests gilt ein Signifikanzniveau von  $p \leq 0,05$ . Die beschriebene Prozedur wurde mit der Software R (Version 3.0.1, Paket „nlme“) durchgeführt.

### **2.4.3 Lineare gemischte Modelle für Longitudinaldaten**

Werden zeitlich wiederholte Messungen an ein und derselben experimentellen Einheit erhoben, spricht man von *Longitudinaldaten* (FARAWAY 2006; RIEDL 2008). Deren Besonderheit besteht in der zeitlichen Schachtelung (dem „zeitlichen Nesting“). So muss beispielsweise angenommen werden, dass der von einer Buche im aktuellen Jahr geleistete Längenzuwachs nicht losgelöst von jenem der Vorjahre betrachtet werden darf. Demzufolge sind die zeitlich wiederholten Messwerte eines Individuums im statistischen Sinn nicht unabhängig und es muss von korrelierten Messwertfehlern ausgegangen werden (vgl. FITZMAURICE ET AL. 2011; DORMANN 2012).

Aus diesem Grund wurden die Longitudinaldaten ebenfalls mittels gemischter linearer Modelle analysiert, nach der im vorangegangenen Abschnitt 2.4.2 (S. 40) geschilderten Prozedur. Dabei mussten die spezifischen Eigenschaften der Zeitreihen im Modell Beachtung finden, wodurch einige vom vorgestellten Verfahren abweichende Arbeitsschritte notwendig wurden. Allein darauf soll an dieser Stelle eingegangen werden:

- Betroffen sind insbesondere die Datenstruktur und folglich der Modellaufbau, welcher das zeitliche Nesting explizit berücksichtigen muss. Das heißt, dass im Fall der Zeitreihen die kleinste Gruppeneinheit, auf der die Wiederholung stattfindet, der Plot oder gar das Einzelindividuum ist. Diese sind fallspezifisch in den Zufallsterm zu integrieren.
- Ein grundlegendes Problem bei der Auswertung von Longitudinaldaten besteht in der Gefahr der zeitlichen Autokorrelation. Da gemischte Modelle jedoch (zeitlich) unkorrelierte Messwertfehler voraussetzen, muss dies geprüft und gegebenenfalls korrigiert werden. Hierzu diene die grafische Darstellung der Autokorrelationsfunktion („ACF“) in R (Abbildung 15).



**Abbildung 15:** Grafische Kontrolle der zeitlichen Autokorrelation aufeinanderfolgender Messungen mit festen Abständen („Lags“). Zu erkennen ist die Überschreitung der Signifikanzschranken ab der dritten Zeitperiode (links). Die aufeinanderfolgenden Messwerte sind somit nicht unabhängig. Dies kann durch die „Auto-Regressive-Korrelationsstruktur“ zumindest weitgehend berücksichtigt werden (rechts).

Bei stets identischen zeitlichen Abständen zwischen den einzelnen Messungen („Lags“) kann auf diesem Weg grafisch geprüft werden, ob die innerhalb der Gruppen vorliegenden Modellresiduen zeitlich aufeinanderfolgender Messungen eine größere Ähnlichkeit besitzen als jene weiter auseinanderliegender Zeitperioden. Da die ACF-Funktion auch die Signifikanzschranken und deren Überschreitung angibt, sind zeitliche Autokorrelationen leicht zu identifizieren (PINHEIRO & BATES 2000). Falls notwendig, erfolgte die Korrektur wiederum mithilfe von Korrelationsfunktionen. Im speziellen Fall der Longitudinaldaten sind dies die „Auto-Regressive-Korrelationsstruktur (corAR1)“, bzw. die erweiterte „Auto-Regressive-Moving-Average-Korrelationsstruktur (corARMA)“ zur Modellierung der zeitlichen Abhängigkeit (PINHEIRO & BATES 2000; VENABLES & RIPLEY 2002).



Die für jede Zuwachsgröße spezifisch hergeleiteten Modellansätze sind Bestandteil des Hauptteils dieser Arbeit, sodass in diesem Kontext auf Kapitel 3.3.2 (S. 61) verwiesen wird.

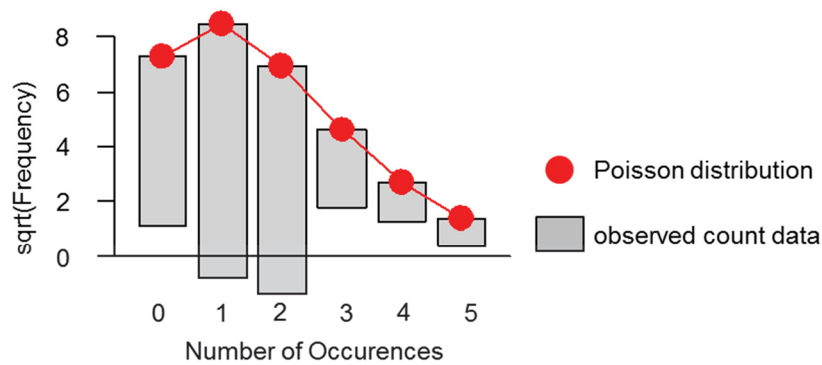
Für alle angewendeten Tests gilt ein Signifikanzniveau von  $p \leq 0,05$ . Die Datenanalyse wurde mit der Software R (Version 3.0.1, Paket „nlme“) durchgeführt.

#### **2.4.4 Gemischte Modelle für Poisson- und binomial verteilte Daten**

Der Anwendungsbereich aller bisher geschilderten Methoden der gemischten linearen Modelle ist durch die zugrunde liegende Normalverteilungsannahme begrenzt. Vor allem in der ökologischen Forschung wird diese Voraussetzung jedoch häufig nicht erfüllt. In dem Fall bieten *generalisierte gemischte lineare Modelle* (GLMM) einen flexibleren Ansatz, um nicht normalverteilte Daten zu analysieren und gleichzeitig geschachtelte Versuchsanlagen mit korrelierten Messwertfehlern zu berücksichtigen (BOLKER ET AL. 2008; ZUUR ET AL. 2009; THIELE & MARKUSSEN 2012).

Die Modellbildung nach der GLMM-Methode wurde wie folgt umgesetzt (vgl. BOLKER ET AL. 2008; ZUUR ET AL. 2009):

- a) Gewählt wurden eine der gegebenen Response-Variable entsprechende Verteilungsart und Linkfunktion. Bei Zähldaten wurde die Poisson-Verteilung zugrunde gelegt, welche eine Logarithmusfunktion als Link verwendet („log link“). Die Analyse von Erfolgswahrscheinlichkeiten („proportional data“) basiert auf der Binomialverteilung und arbeitet mit der „Logit“-Linkfunktion. Linkfunktionen dienen der Linearisierung der Response-Variable und der Homogenisierung der Varianzen im Modell (THIELE & MARKUSSEN 2012), das heißt, sie beschreiben die Beziehung zwischen unabhängiger und erklärender Variable (DORMANN 2012)
- b) Ob die jeweilige Verteilungsannahme gerechtfertigt ist, wurde vor der Modellbildung mit einem Goodness-of-Fit-Test geprüft (THIELE & MARKUSSEN 2012). In R geschieht dies über die „goodfit“-Funktion im Paket „vcd“, welche zugleich die grafische Gegenüberstellung der beobachteten Häufigkeitsverteilung mit der zugrunde gelegten Verteilungsart erlaubt (Abbildung 16).



**Abbildung 16:** Goodness-of-Fit-Plot zur Gegenüberstellung der beobachteten Häufigkeitsverteilung (graue Balken) mit einer optimalen Poisson-Verteilung (rote Punkte). Ein Überschreiten der x-Achse zeigt an, dass diese Gruppe häufiger auftritt, als auf der Grundlage der optimalen Poisson-Verteilung erwartet wurde. Erreichen die grauen Balken die x-Achse nicht, ist die entsprechende Gruppe unterrepräsentiert.

- c) Ein zunächst vorgeschaltetes GLM (ohne Zufallseffekte), welches alle als bedeutsam erachteten festen Effekte sowie Wechselwirkungen enthält, dient der Berechnung der Streuung im Modell und somit der Prüfung auf „Overdispersion“. Diese liegt vor, wenn die Varianz der Modellresiduen erheblich größer ist, als bei der angenommenen Verteilung zu erwarten wäre (FARAWAY 2006). Bei einer Poisson-Verteilung ist dies der Fall, wenn die Varianz den Mittelwert übersteigt (ZUUR ET AL. 2009). Dies ist möglicherweise ein Hinweis auf Fehler in der Modellkonstruktion (fehlende Prädiktoren, falsche Linkfunktion etc.), deren Ursachen vor der Fortführung der Modellbildung zu prüfen und gegebenenfalls zu beheben sind (FARAWAY 2006; ZUUR ET AL. 2009).

Mithilfe des „drop1“-Befehls in R kann zudem geprüft werden, ob das volle Modell bedeutungslose Faktoren bzw. Wechselwirkungen enthält, die eliminiert werden müssen (ZUUR ET AL. 2009). Das Ergebnis dieses iterativen Verbesserungsprozesses wird durch einen F-Test statistisch abgesichert.

- d) Auch für die Parameterschätzung wurde eine geeignete Methode ausgewählt. Aufgrund der mehrfach geschachtelten Versuchsanlage fiel die Wahl im konkreten Fall auf ein glmmPQL gewählt, wobei PQL für „Penalized Quasi-Likelihood“ steht. Dieses Verfahren erlaubt neben der Bestimmung von festen und zufälligen Effekten auch die Berücksichtigung spezifischer Korrelationsstrukturen im Modell (ähnlich wie LMM). Zudem wird gegebenenfalls auch eine Over- bzw. Underdispersion beachtet (VENABLES & RIPLEY 2002).

PQL wird als geeignetes Verfahren empfohlen, wenn bei annähernder Poisson-Verteilung nicht weniger als fünf Beobachtungen pro Faktorstufenkombination vorliegen bzw. eine Binomialverteilung aus mindestens fünf Erfolgs- sowie Misserfolgsereignissen gegeben

ist (BRESLOW 2004). Diese Voraussetzung war in der vorliegenden Untersuchung generell erfüllt.

- e) Die Konstruktion des vollständigen Modells im glmmPQL ist der des LMM sehr ähnlich. Die Abbildung der Qualitätsparameter erfolgt durch eine lineare Beziehung aus Konstante (Intercept), Schirm (Faktor), Pflanzenzahl (Kovariate) und Entwicklungsstadium (Faktor). In bereits bekannter Weise wird die hierarchische Schachtelung der Versuchsanlage durch einen entsprechenden Zufallsterm implementiert. Auch im glmmPQL können sowohl die Einzeleffekte als auch die Wechselwirkungen der erklärenden Variable berechnet werden. Für detailliertere Ausführungen wird auf Kapitel 2.4.2 (S. 40) verwiesen.
- f) Das vollständige Modell musste nun noch auf folgende Annahmen zur Verteilung der Modellresiduen überprüft werden (vgl. Kapitel 2.4.2, S. 40):
- Varianzhomogenität: grafische Darstellung der standardisierten Residuen gegenüber der Modellschätzung im Streudiagramm
  - räumliche Korrelation: Korrelogramme, Semivariogramme
  - Normalverteilung: QQ-Plots, SHAPIRO-WILK-Test
- g) Um Schwierigkeiten bezüglich der Interpretation zu umgehen, wurde stets ein Kompromiss zwischen hoher Anpassungsgüte und möglichst geringer Komplexität des Modells angestrebt. Im Hinblick auf den Modellvergleich sowie die Auswahl des jeweils besten Modells ist das Verfahren glmmPQL mit einigen Nachteilen verbunden. Da anstatt der klassischen Methode der Maximum Likelihood eine Quasi-Likelihood-Schätzung erfolgt, werden im PQL keine Informationskriterien (AIC) generiert, wodurch in der Folge auch der Modellvergleich mittels Likelihood-Ratio-Test (LR) nicht möglich ist (ZUUR ET AL. 2009; THIELE & MARKUSSEN 2012).

Lediglich zu Vergleichszwecken wurden die jeweiligen Modelle darum außerdem nach der Methode glmmML gerechnet. Diese umfasst den Vorteil der Maximum-Likelihood-Schätzung, zudem wird auch das AIC angegeben. Allerdings kann in glmmML nur eine Clustervariable (Zufallseffekt) berücksichtigt werden, sodass sich dieser Ansatz für das vorliegende Versuchsdesign als ungeeignet erwies. Da beide Ansätze aber sehr ähnliche Ergebnisse liefern (ZUUR ET AL. 2009), konnte auf diesem Weg die Modellkonstruktion mit der höchsten Güte identifiziert werden. Dieses wurde dann, wiederum auf Basis des glmmPQL, als bestes Modell ausgewählt.

Die angewendeten Prozeduren sind Bestandteil des „MASS“-Pakets in R (Version 3.0.1).

### 2.4.5 Modelle für ordinal multinomiale Daten

Ist eine Response-Variable durch mehr als zwei Merkmalsausprägungen charakterisiert, liegen multinomiale Daten vor. Die Multinomialverteilung ist demzufolge eine stetige Wahrscheinlichkeitsverteilung, welche den Ansatz der Binomialverteilung um den speziellen Fall von mehr als zwei Ereignismöglichkeiten erweitert (HEDDERICH & SACHS 2012). Besteht weiterhin zwischen den einzelnen Kategorien der Response-Variable eine feste Rangordnung (z. B. Qualität 1 besser als 2 etc.), spricht man von ordinal-multinomialen Daten (VENABLES & RIPLEY 2002; FARAWAY 2006).

Zur statistischen Analyse solcher Daten wurde ein logistisches Regressionsmodell, das sogenannte *Proportional Odds Logistic Regression Model* (POLR), in der bei FARAWAY (2006) beschriebenen Vorgehensweise verwendet:

- a) Durch das Erstellen einer Kreuztabelle für die Häufigkeiten aller möglichen Faktorstufenkombinationen und Kategorien der Response-Variable lassen sich leere oder schwach besetzte Zellen identifizieren, die Schwächen in der Modellaussage oder aber Probleme bei der Modellberechnung hervorrufen.
- b) Das POLR ist eine Erweiterung des logistischen Regressionsmodells und nutzt die Logit-Linkfunktion. Dadurch wird erreicht, dass die abhängige Variable ( $y$ ) unabhängig von  $x$  stets Werte im Bereich  $0 \leq y \leq 1$  annimmt, welche als deren kumulative Eintrittswahrscheinlichkeiten ( $\gamma_{ij}$ ,  $j$  = Kategorien,  $i$  = Individuen) zu verstehen sind. Zudem verknüpft die Linkfunktion die Eintrittswahrscheinlichkeiten zugleich mit der zu untersuchenden Kovariate ( $x_i$ ).

$$\theta_j - x_i \beta_k = \log \frac{\gamma_j(x_i)}{1 - \gamma_j(x_i)} \quad j = 1, \dots, J-1 \quad (5)$$

Der ordinale Charakter der Response-Variable erlaubt es, diese in mehrere dichotome Vergleichsgruppen zu zerlegen. Durch explizite Berücksichtigung der Rangordnung werden so stets Vergleiche zwischen niedrigeren und höheren Kategorien vollzogen ( $y > j$  vs.  $y \leq j$ ). In Abhängigkeit von der Anzahl der Kategorien ( $j$ ) der Response-Variable ( $y_j$ ) ergeben sich so  $j-1$  binäre Vergleichspaare (MOUTINHO & HUTCHESON 2011).

Die in diesem Kontext entscheidende Annahme der Methode POLR ist, dass der Regressionsterm  $x_i\beta_k$  unabhängig von  $j$  ist, sodass die Regressionsparameter  $\beta_k$  bei allen Vergleichspaaren der Response-Variable einen identischen Effekt haben. Aus diesem Grund kommt das Modell mit nur einem (über alle Vergleichsgruppen gemittelten) Regressionskoeffizienten für jede erklärende Variable aus (AGRESTI 2002; CHRISTENSEN 2013).

Es erfolgt eine separate Festlegung des Intercept ( $\theta_j$ ), sodass der Vektor der erklärenden Variable ( $x_i$ ) kein Intercept beinhaltet. Intercepts sind als „Cut Points“ zu betrachten, da sie die Übergänge zwischen den  $j$  Kategorien angeben (IDRE 2015). Ein Modell umfasst somit stets  $j-1$  Intercepts.

- c) Die Modellbildung selbst ist als iterativer Prozess zu verstehen, sodass zunächst immer ein Initialmodell in POLR konstruiert wurde, das alle für bedeutsam erachteten Faktoren und Kovariaten beinhaltet (6).

$$\text{logit} [\text{Pr}(y > j)]_{mn} = (\beta_0) \text{Intercept} + (\beta_{1,m}) \text{Schirm} + (\beta_2) \text{Pflanzenzahl} + (\beta_{3,n}) \text{Stadium} \quad (6)$$

Dabei gibt  $\text{Pr}(y)$  die Wahrscheinlichkeit einer Kategorie  $> j$  an,  $\beta_{0-3}$  die Modellparameter. Die Indizes  $m-n$  stehen für die Faktorstufen der Parameter.

- d) Die spezielle „Proportional Odds Assumption“, der zufolge eine erklärende Variable im Modell bei allen binären Vergleichsgruppen einen identischen Effekt auf die Response-Variable hat, muss überprüft werden (FARAWAY 2006; IDRE 2015). Dies geschieht, indem die Streuung des POLR-Modells mit der eines multinomialen logistischen Regressionsmodells (ohne Rücksicht auf die Rangordnung der Response-Kategorien) verglichen wird. Ergibt der Likelihood-Ratio-Test keinen signifikanten Unterschied, ist die zugrunde gelegte Annahme gerechtfertigt (MOUTINHO & HUTCHESON 2011), was bedeutet, dass das Modell mit nur einem Set an Regressionskoeffizienten für alle Vergleichsgruppen auskommt.
- e) Im nun anschließenden Schritt wird versucht, das Initialmodell zu verbessern. Der hierfür in R verfügbare Algorithmus „stepAIC“ prüft durch die schrittweise Ergänzung bzw. Entnahme von Parametern bzw. deren Wechselwirkungen, welche Faktoren/Kovariaten von Bedeutung sind. Auf diesem Weg wird das Modell mit der höchsten Anpassungsgüte gefunden, wobei als Maßstab allein das AIC dient (VENABLES & RIPLEY 2002).

Um den Verbesserungsprozess statistisch abzusichern, wurde das angepasste Modell abschließend mit dem Initialmodell verglichen. Hierzu diente ein Likelihood-Ratio-Test für ordinale Regressionsmodelle, der in R über den „anova“-Befehl auszuführen ist.

Im Ergebnis ermittelt das Proportional-Odds-Modell einen Parameter, der Ausdruck der Wahrscheinlichkeit ist, dass die Response-Variable eine höhere statt einer geringeren Kategorie annimmt, wenn sich die erklärenden Variablen ändern (MOUTINHO & HUTCHESON 2011).

Bezogen auf das Versuchsdesign der vorliegenden Arbeit hat die Methode der POLR allerdings den wesentlichen Nachteil, dass keine Zufallseffekte einbezogen werden können. Die einzige Option, diese dennoch zu berücksichtigen, besteht darin, sie als fixe Effekte zu verschlüsseln.

Die Funktion POLR wird in R (Version 3.0.1) über das Paket „MASS“ aufgerufen.

## **2.5 Kurze Zusammenfassung zu Material und Methoden**

Im Landeswald Thüringens und Sachsens wurden innerhalb des typischen Standortspektrums von Waldumbaumaßnahmen mit Buchenvoranbau zwei Modellregionen bestimmt, in denen die Effekte eines unplanmäßigen Schirmverlusts durch den Orkan KYRILL (Januar 2007) auf die Qualität vorangebauter Buchen untersucht werden sollten. In Thüringen umfasst die Modellregion die Forstämter Frauenwald und Oberhof im Mittleren Thüringer Wald sowie Sonneberg im westlichen Frankenwald. In Sachsen wurden die Forstbezirke Bärenfels im östlichen und Eibenstock im westlichen Erzgebirge sowie Chemnitz im Lößhügelland einbezogen. Von den insgesamt 29 nach standörtlichen und bestockungsspezifischen Merkmalen ausgewählten Versuchsflächen wiesen 17 einen zumindest partiellen Schirmverlust auf. Alle übrigen Bestände besitzen nach wie vor den Fichtenschirm und dienen als Referenz. Jedem Voranbau wurde das auf den Freistellungszeitpunkt bezogene Entwicklungsstadium (vor oder nach Dickungsschluss) zugewiesen.

Da sich die Verhältnisse in den Voranbauten ausgesprochen heterogen darstellten, diente ein rasterbasiertes Probekreisverfahren der repräsentativen und objektiven Festlegung der Aufnahmeeinheiten in den Flächen. Dieses wurde im GIS geplant und mittels GPS in den Flächen etabliert. Das quadratische Gitternetz besitzt eine Weite von 20 m. Die Rasterschnittpunkte bilden zugleich die Mittelpunkte der 19,95 m<sup>2</sup> großen Probekreise (Radius: 2,52 m). Anhand eines Kriterienkatalogs wurden 204 repräsentative Plots



ausgewählt. In den Probekreisen wurde auch die Pflanzendichte des Voranbaus erhoben, die als Basis für die spätere standraumabhängige Analyse dienen soll. Für die Referenzflächen erfolgte außerdem eine Ansprache des Überschirmungsgrads, sodass nur Plots mit lockerlichem Fichtenschirm inbegriffen sind. Die Datenaufnahme sollte auf die (vor-)herrschenden und somit vitalsten Bestandesglieder konzentriert werden. Sie berücksichtigt darum innerhalb eines Probekreises maximal die sechs höchsten Buchen. Daraus resultiert ein Stichprobenumfang von 895 Einzelbäumen. Die Datenaufnahme fand nach Abschluss der Vegetationsperiode 2012 statt, sodass seit der Freistellung sechs Jahre vergangen waren.

Die mathematisch-statistische Auswertung wurde durch verschiedene regressionsanalytische Verfahren umgesetzt. Aufgrund der räumlich geschachtelten Versuchsanlage kamen bevorzugt gemischte Modelle zur Anwendung. In Abhängigkeit vom Skalenniveau der Response-Variable und dem vorliegenden Verteilungstyp wurden lineare gemischte Modelle oder aber generalisierte lineare gemischte Modelle eingesetzt. Multinomialdaten mit fester Rangordnung der Response-Kategorien wurden mit einem erweiterten logistischen Regressionsmodell, der Proportional Odds Logistic Regression (POLR), analysiert. Zur Umsetzung aller beschriebenen Methoden wurde die Statistiksoftware R (Version 3.0.1) genutzt.

### **3 Wachstum und Zuwachsreaktion vorangebauter Buchen nach sturmbedingtem Schirmverlust**

#### **3.1 Hintergrund und Zielstellung**

Die Buche (*Fagus sylvatica* L.) ist eine typische Schattbaumart (NIINEMETS & VALLADERES 2006; EWALD 2007; JARCUSKA 2009). Aufgrund der damit einhergehenden Arteigenschaften sind ihre erfolgreiche Verjüngung und vitale Jugendentwicklung an ausgeglichene Umweltbedingungen, namentlich den Schutz vor Klimaextremen wie Spätfrost und Trockenheit, gebunden (BROWN 1952; OTTO 1994; NIINEMETS & VALLADERES 2006). Optimale Gegebenheiten finden sich folglich bei moderater Altholzüberschirmung (PETRITAN ET AL. 2007; WAGNER ET AL. 2010). Diese ökologischen Ansprüche werden heute zumeist auch bei der künstlichen Verjüngung der Buche berücksichtigt. So ist es beim Waldumbau von Fichtenreinbeständen gängige Praxis, die Einbringung der Buche mittels Voranbau unter einem aufgelichteten Fichtenschirm zu realisieren (SPELLMANN & WAGNER 1993; OTTO 1995; HERING ET AL. 1999; BUTTER 2001; LEITGEB ET AL. 2005; ECKARDT & ARENHÖVEL 2006; RÖHRIG ET AL. 2006). Dem Schirm kommt in diesem Zusammenhang eine weitere wichtige Rolle als waldbauliches Instrument zur Regulierung der Ressourcenversorgung für die Verjüngung zu (AMMER 2000; LÖF ET AL. 2007). Durch dosierte Lichtgabe und periodische Durchforstungen des Fichtenaltholzes werden Wachstum und Qualitätsentwicklung der jungen Buchen gesteuert. Als optimal wird ein Überschirmungsgrad angesehen, bei dem die Buchen ein gleichmäßiges, vitales Höhenwachstum zeigen, Durchmesser- und Astwachstum aber reduziert sind. Unter diesen Bedingungen sind erhebliche Anteile wipfelschäftiger, schlanker und somit qualitativ erwünschter Wuchsformen zu erwarten (LEONHARDT & WAGNER 2006; HERTRAMPF 2009; LINNERT 2009).

Doch vor dem Hintergrund voranschreitender Klimaveränderungen und der damit einhergehenden Häufung extremer Witterungsereignisse wie z. B. Sturm oder Dürreperioden (THOMASUS 1991; BENISTON ET AL. 2007; MAJUNKE ET AL. 2008), besteht erhebliche Unsicherheit darüber, ob der aufgelichtete Fichtenschirm für einen ausreichend langen Zeitraum erhalten bleibt, um diese das Wachstum dämpfende und qualifizierende Funktion erfüllen zu können. Die Erfahrungen der jüngeren Vergangenheit zeigen, dass gerade Fichtenalthölzer besonders oft durch Stürme geschädigt wurden (BRÄUNIG & DIETER 1999; DOBBERTIN ET AL. 2002; SCHMIDT ET AL. 2010). Kommt es kalamitätsbedingt zu einem solchen plötzlichen Schirmverlust, werden die an den Halbschatten adaptieren Buchen völlig

unvorbereitet Umweltbedingungen ausgesetzt, welche ganz erheblich von denen unter Fichtenschirm abweichen (AUSSENAC 2000).

Eine umfänglich erforschte Eigenschaft der Gattung *Fagus* ist ihre hohe morphologische Plastizität, welche vor allem der Adaption an variierende Strahlungsbedingungen unter dem Altholzschirm, aber auch der zügigen Reaktion auf neu entstandene Kronendachlücken dient (CANHAM 1988; BEAUDET & MESSIER 1998; PLANCHAIS & SINOQUET 1998; CAO 2001; VALLADERES ET AL. 2002; CURT ET AL. 2005; KUNSTLER ET AL. 2005; COLLET ET AL. 2011; SCHALL ET AL. 2012). Fraglich ist jedoch, wie morphologisch an den Halbschatten angepasste Buchen auf eine drastische Umweltänderung, z. B. eine abrupte Freistellung, reagieren. Erste Anhaltspunkte hierzu liefern die Arbeiten von COLLET ET AL. (2001), BEAUDET ET AL. (2007) sowie BARNA ET AL. (2009). Diese Untersuchungen beziehen sich ausschließlich auf naturverjüngte Buchen, die bis zu ihrer Freistellung unter sehr dichter Überschirmung aufwuchsen. Explizit zur Wachstumsreaktion vorangebauter Buchen im Jungwuchs- bzw. Dickungsstadium nach einem Verlust des Fichtenschirms sind bisher keine Forschungsergebnisse vorhanden. Dies gilt folglich auch für die aus forstwirtschaftlicher Sicht besonders wichtige Qualitätsentwicklung der Buchen. Aus diesen Gründen wurden Buchenvoranbauten auf Windwurfflächen des Orkans KYRILL vom Januar 2007 hinsichtlich ihrer Wachstumsreaktion und der damit verbundenen Qualitätsentwicklung nach der Freistellung untersucht. Dabei wurde folgenden Forschungsfragen nachgegangen:

- Ist innerhalb von sechs Vegetationsperioden nach dem Sturm eine Höhen- und Durchmesserdivergenz zwischen freigestellten sowie weiterhin übershirmten Buchenvoranbauten nachweisbar?
- Wie verhalten sich jährlicher Höhen- und Radialzuwachs nach dem Schirmverlust hinsichtlich Zeitpunkt und Intensität einer Wachstumsreaktion?
- Wie wirkt sich die Freistellung auf den Radialzuwachs der Äste und somit die Qualität der Buchen aus und besteht ein Zusammenhang zwischen Ast- und Stammzuwachs?
- In welcher Weise beeinflussen das Entwicklungsstadium (Dickungsschluss) und die Pflanzendichte im Voranbau (intraspezifischen Konkurrenz) das Wachstum und somit die Qualität nach einem Schirmverlust?

Die Forschungsergebnisse sollen zum Verständnis der Adaptionfähigkeit junger Buchen an eine plötzliche Umweltänderung beitragen. Weiterhin wird der Zusammenhang zwischen Wachstum und Qualitätsentwicklung aufgezeigt. Aus den Ergebnissen können Empfehlungen

zur waldbaulichen Behandlung des Fichtenschirms über Buchenvoranbauten abgeleitet werden.

## 3.2 Material und Methoden

### 3.2.1 Erhebung der Wachstumsgrößen

Die Quantifizierung des Längen- und Durchmesserwachstums der Buchenvoranbauten erfolgte einerseits über Zustandsgrößen, welche die Situation sechs Jahre nach dem Schirmverlust widerspiegeln. In dieser Arbeit kommt periodenspezifischen Zuwachsparemtern aber eine höhere Bedeutung zu, da nur sie präzise Aussagen über Reaktionsdynamik und Intensität einer freistellungsbedingten Wachstumsänderung erlauben. Einen Überblick über die Aufnahmemethodik der erhobenen Größen gibt Tabelle 9.

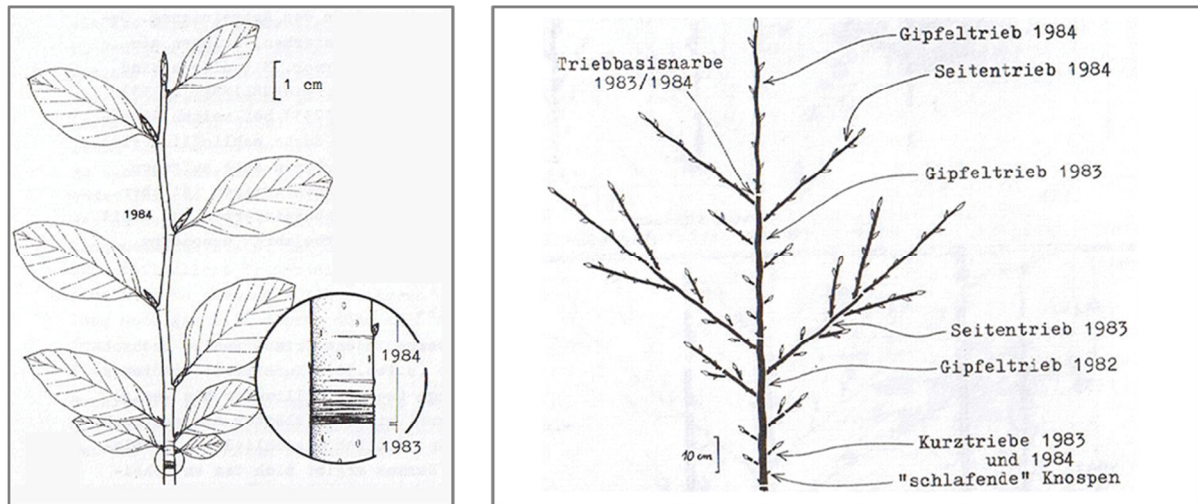
**Tabelle 9:** Übersicht über die erhobenen Wachstumsgrößen und deren Aufnahmemethodik.

	Parameter	Messverfahren	Genauigkeit	Instrument
<b>Höhenwachstum</b>	Baumhöhe	Lotrechte zwischen Grund und Spitze der Terminalknospe	5 cm	Teleskopmesslatte/ Fluchtstange mit Maßeinheit
	jährliche Haupttrieblänge	Jahre 2005–2012, Orientierung an Triebbasisnarben	0,5 cm	Gliedermaßstab
<b>Durchmesserwachstum</b>	Wurzelhalsdurchmesser	Kreuzkluppung, 10 cm über Grund	1 mm	elektronischer Messschieber (SYLVAC, Modell S 225)

Besonderes Augenmerk wurde dem Längenzuwachs des Haupttriebs in den vergangenen acht Vegetationsperioden (2005–2012) gewidmet. Anhand dieser Daten kann die Zuwachsreaktion unmittelbar nach dem Schirmverlust abgebildet und mit Werten vor der Freistellung (Jahre 2005 und 2006) verglichen werden. Zur Abgrenzung einzelner Längenzuwachseinheiten dienten die Triebbasisnarben. Diese Methode wurde an der Buche bereits mehrfach erprobt und als durchaus praktikabel befunden (GRUBER 1998; COLLET ET AL. 2002; DAMMANN ET AL. 2009). Als Triebbasisnarben werden die Narben der Knospenschuppen verstanden, welche dicht gedrängt auf der Achse saßen und die frischen Triebanlagen umschlossen. Beim Austreiben im Frühjahr fallen diese ab und hinterlassen dicht gedrängte Rillen auf dem Trieb, welche aufgrund der Glattrindigkeit der Buche noch viele Jahre erkennbar sind (ROLOFF 1986). Sie können folglich zur retrospektiven, chronologischen Alters- und Zuwachsbestimmung genutzt werden (Abbildung 17, links).

Diese Methode wurde weiterhin durch die typische Verzweigungsmorphologie der Buche unterstützt und abgesichert. Die Haupttriebarchitektur der Buche folgt einer strengen Akrotonie, das heißt, Länge (und auch Durchmesser) der Seitenachsen an einem

Triebabschnitt nehmen von der Basis bis zur Triebspitze deutlich zu (KÜPPERS 1987, 1989). Demnach befindet sich die Grenze zwischen zwei Jahrestrieben stets oberhalb des Absatzes in der Verzweigung (ROLOFF 1986) (Abbildung 17, rechts).



**Abbildung 17:** Triebmorphologie der Rotbuche nach ROLOFF (1986). Die Grenzen zweier Jahrestriebe (hier Langtriebe) sind durch dicht gedrängte Rillen auf der glatten Rinde, die Triebbasissnarben, gekennzeichnet (links). Zudem weist die Buche eine typische akrotone Verzweigung auf, welche sich in einer Längenzunahme der Seitentriebe mit steigender Ansatzhöhe an einem Jahrestrieb widerspiegelt. Die Grenzen zwischen zwei Jahreszuwächsen befinden sich somit oberhalb der Absätze in der Verzweigung (rechts). Zeichnungen aus ROLOFF (1986).

Auf der Grundlage der TriebLängenanalyse konnte auch die Höhe der Buchen zum Zeitpunkt des Schirmverlusts im Januar 2007 ermittelt werden. Diese ergibt sich durch die Subtraktion der Jahrestrieblängen 2007–2012 von der im Herbst 2012 gemessenen Baumhöhe.

### 3.2.2 Jahrringanalyse

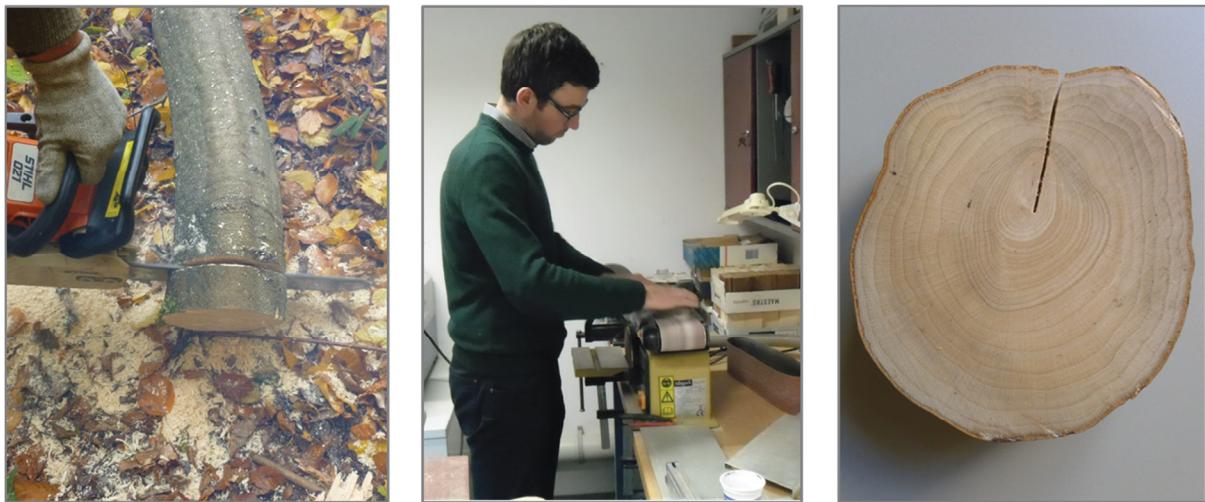
Im Jahrringverlauf sind Informationen über die Umweltbedingungen, vor allem aber über die Reaktion eines Baumes auf eine Umweltveränderung gespeichert, sodass sie jederzeit retrospektiv nachvollzogen werden können (SPIECKER 2002; BOWMAN ET AL. 2013). Dieser methodische Vorteil wurde auch in der vorliegenden Arbeit genutzt, um die durch den Schirmverlust hervorgerufenen Reaktionsmuster des Radialzuwachses von Stamm und Ästen der jungen Buchen abzubilden.

Da vornehmlich das Wuchsverhalten der herrschenden Bestandesschicht von Interesse ist, wurde hierfür auf jedem Plot die Buche mit der zweitgrößten Höhe ausgesucht. Dadurch sollte vermieden werden, dass der höchste Baum, welcher womöglich ein vorwüchsiger „Wolf“ ist, als repräsentativ für das herrschende Kollektiv betrachtet wird („big-tree selection bias“, vgl. BRIENEN ET AL. 2012). Der zweithöchste Baum gehört dagegen stets zu den herrschenden Individuen in einem Probekreis und entspricht somit hinsichtlich Vitalität und



soziologischer Stellung im Bestand den Anforderungen an einen Z-Baum-Anwärter. Die Jahrringanalyse erfolgte nur auf den 14 Versuchsflächen in Thüringen und umfasst somit 93 Einzelbäume. Das Probenmaterial wurde im Oktober 2013, also sieben Vegetationsperioden nach dem Schirmverlust gewonnen. Dazu wurden die Bäume motormanuell gefällt und jeweils eine etwa 5 cm starke Scheibe vom Stamm (10 cm über Grund) und vom stärksten Grünast (5 cm über der Ansatzstelle) entnommen (Abbildung 18). Jeder Probe wurden die Baumnummer sowie eine Kennzeichnung für Stamm- (S) bzw. Astscheibe (A) zugewiesen. Die Stichprobe beinhaltet demzufolge insgesamt 186 Scheiben.

Um schwindungsbedingter Rissbildung vorzubeugen, wurden die frischen Stammscheiben mit einem Radialschnitt versehen. Anschließend kamen sie für etwa vier Stunden bei 60 °C in den Trockenschrank. Dieser Schritt war notwendig, da die Oberflächen der feuchten Scheiben beim Schleifen verschmierten, was die Detektion der Jahrringe deutlich erschwerte. Die vorgetrockneten Proben wurden dann auf dem Bandschleifer bis zur 240er-Körnung geschliffen, sodass die Jahrringe am Ende klar erkennbar waren (Abbildung 18).



**Abbildung 18:** Die Gewinnung der Stamm- und Astscheiben erfolgte mittels Motorkettensäge (links). Die Rohscheiben wurden auf dem Bandschleifer bis zur 240er-Körnung geschliffen (Mitte). Nach dieser Präparation waren die Jahrringe gut erkennbar (rechts).

Für die vorliegende Arbeit ist vor allem die Periode seit dem Verlust des Fichtenschirms im Januar 2007 von Interesse. Aus diesem Grund wurde die Messung – anders als bei dendrochronologischen Untersuchungen üblich – am äußeren Jahrring begonnen und sozusagen rückwärts in Richtung der Markröhre fortgeführt. Dieses Vorgehen hat den zusätzlichen Vorteil, dass eventuelle Messfehler im engeren, schwer detektierbaren Kernbereich der Scheibe unterbunden werden.



An jeder Scheibe sollten vier Radien gemessen werden, die zuvor mit Bleistift aufgetragen und nummeriert wurden (Abbildung 19). Unter einem Binokular (Nikon SMZ-1B, maximal 3,5-fache Vergrößerung) wurden anschließend auch die Jahrringe gekennzeichnet und in Fünferschritten nummeriert. Sofern es das Alter der Bäume bzw. Äste erlaubte, sollte der retrospektiv betrachtete Zeitabschnitt möglichst bis zum Jahr 2000 zurückreichen, damit im Idealfall eine 15-jährige Analyseperiode gegeben war. An jedem fünften Ring wurde die Übereinstimmung zwischen den vier Messstellen einer Probe kontrolliert, wodurch Scheinjahrringe, aber auch (partiell) fehlende Wachstumszonen als Fehlerquellen identifiziert werden konnten (BONTEMPS ET AL. 2010). Weiterhin traten infolge von Reaktionsholzbildung Schwankungen der Jahrringbreite innerhalb derselben Zuwachszone auf, welche in Form der wiederholten Messung ebenfalls Berücksichtigung fanden.



**Abbildung 19:** Computergestützte Jahrringanalyse mit Linearmesstisch, Binokular und entsprechender Software (links). Auf jeder Scheibe wurden die vier zu messenden Radien und die Jahrringgrenzen markiert und in Fünferschritten nummeriert (rechts).

Zur technischen Durchführung des Verfahrens konnte die Jahrringmessanlage der Professur für Forstnutzung (TU Dresden) eingesetzt werden. Das computergestützte System basiert auf der Software TSAP-Win<sup>TM</sup> Professional (RINNTECH, Version 4.69) und verwendet einen Linear-Mikrometer-Messtisch (isel-automation, Eiterfeld) mit Binokular. Der Messtisch ist mit dem PC verbunden, wird jedoch über einen Spindelantrieb manuell bewegt. Dabei wird das Überschreiten einer Jahrringgrenze per Mausklick registriert (Abbildung 19, links). Die zwischen zwei Klicks zurückgelegte Entfernung entspricht der Jahrringbreite, welche mit einer Genauigkeit von 1/100 mm erfasst wird.

### 3.3 Statistische Auswertung

#### 3.3.1 Analyse der Zustandsgrößen

Zur statistischen Analyse von Zustandsgrößen, worunter Wachstumsparameter mit einmaliger Erfassung, beispielsweise Baumhöhe und Durchmesser, zu verstehen sind, wurden lineare gemischte Modell (LMM) gewählt. Unter Berücksichtigung der in Kapitel 2.4.2 (S. 40) erläuterten Prozedur resultieren daraus die folgenden Modellgleichungen:

$$\begin{aligned} \text{Höhe}_{2006_{ijklm}} = & (\beta_0) \text{Intercept} + (\beta_{1,i}) \text{Schirm} + (\beta_2) \text{Pflanzenzahl} + (\beta_{3,j}) \text{Stadium} + \\ & (b_{4,k}) \text{Forstbetrieb} + (b_{5,l}) \text{Fläche} + \varepsilon_{ijklm} \end{aligned} \quad (7)$$

Die Höhe der Buchen zum Zeitpunkt des durch den Orkan KYRILL herbeigeführten Schirmverlusts entspricht jener am Ende der Vegetationsperiode 2006 ( $\text{Höhe}_{2006}$ ). Diese kann über eine lineare Beziehung aus  $(\beta_0)$  Intercept, den Faktoren  $(\beta_{1,i})$  Schirm (zwei Stufen: Freistellung vs. unter Schirm) und  $(\beta_{3,j})$  Entwicklungsstadium (zwei Stufen: vor vs. nach Dichtungsschluss) sowie  $(\beta_2)$  Pflanzenzahl als Kovariate abgebildet werden. Zudem erklären  $(b_{4,k})$  Forstbetrieb und  $(b_{5,l})$  Versuchsfläche einen merklichen Teil der Varianz, was im Zufallsterm bedacht wird.  $\varepsilon$  beinhaltet die Reststreuung. Die Indizes stehen für die verschiedenen Faktorstufen der festen  $(i-j)$  bzw. zufälligen Effekte  $(k-l)$  sowie die Einzelwerte auf Plotebene  $(m)$ .

Das Modell für die Buchenhöhen sechs Jahre nach der Freistellung ( $\text{Höhe}_{2012}$ ) unterscheidet sich nur dadurch von (7), dass es neben den Einzeleffekten von  $(\beta_{1,i})$  Schirm und  $(\beta_2)$  Pflanzenzahl auch deren Wechselwirkung berücksichtigt (8):

$$\begin{aligned} \text{Höhe}_{2012_{ijklm}} = & (\beta_0) \text{Intercept} + (\beta_{1,i}) \text{Schirm} \times (\beta_2) \text{Pflanzenzahl} + (\beta_{3,j}) \text{Stadium} + \\ & (b_{4,k}) \text{Forstbetrieb} + (b_{5,l}) \text{Fläche} + \varepsilon_{ijklm} \end{aligned} \quad (8)$$

Der Wurzelhalsdurchmesser der Buchen im Jahr 2012 ( $\text{WHD}_{2012}$ ) wird hingegen durch eine etwas andere Modellkonstruktion beschrieben. Das betrifft speziell die Kovariate, welche als natürlicher Logarithmus der Pflanzenzahl ( $\ln$ ) eingeht. Damit folgt das Modell der Annahme, dass die Wirkung einer zusätzlichen Stammzahlsteigerung auf den Durchmesser der Buchen mit zunehmender Bestandesdichte stetig schwindet. Zudem tritt die  $(\beta_2)$  Pflanzenzahl nicht nur als Einzeleffekt, sondern auch in Wechselbeziehung mit dem  $(\beta_{3,j})$  Entwicklungsstadium auf. Eine individuelle Streuung wird durch die zufälligen Komponenten  $(b_{4,k})$  Forstbetrieb und  $(b_{5,l})$  Fläche erklärt (9).

$$WHD_{2012_{ijklm}} = (\beta_0) \text{ Intercept} + (\beta_{1,i}) \text{ Schirm} + (\beta_2) \ln(\text{Pflanzenzahl}) \times (\beta_{3,j}) \text{ Stadium} + \\ (b_{4,k}) \text{ Forstbetrieb} + (b_{5,l}) \text{ Fläche} + \varepsilon_{ijklm} \quad (9)$$

Aus der Relation von Baumhöhe [m] und Wurzelhalsdurchmesser [cm] im Jahr 2012 ergibt sich der H/D-Wert ( $HD_{2012}$ ) als Vitalitäts- und Stabilitätsindikator. Dieser ist über ein relativ einfaches lineares Modell zu erklären, das die beiden Faktoren sowie die Kovariate als Einzeleffekte berücksichtigt und nur die  $(b_{4,k})$  Versuchsfläche im Zufallsterm benötigt (10).

$$HD_{2012_{ijkl}} = (\beta_0) \text{ Intercept} + (\beta_{1,i}) \text{ Schirm} + (\beta_2) \text{ Pflanzenzahl} + (\beta_{3,j}) \text{ Stadium} + \\ (b_{4,k}) \text{ Fläche} + \varepsilon_{ijkl} \quad (10)$$

### 3.3.2 Zeitreihenanalyse für Zuwachsdaten

Die Zuwachsdaten Haupttrieblänge und Jahrringbreite wurden wiederholt, das heißt, für mehrere aufeinanderfolgende Vegetationsperioden erfasst. Die Besonderheit der vorliegenden Arbeit ergibt sich aus einer abrupten Änderung der Umweltbedingungen, welche durch den innerhalb des Messzeitraums eingetretenen Schirmverlust eintritt. Im Fokus der Analyse steht somit der unmittelbare Effekt dieser Freistellung auf den Wachstumsgang der Buchen.

Da sich diese Umweltänderung plötzlich und unvorbereitet manifestierte, war eine (mehr oder minder sprunghafte) Reaktion des Wachstumsverlaufs zu erwarten. Um diese abzubilden, waren einfache lineare Beziehungen folglich nicht geeignet, weshalb auf polynomische Funktionen zurückgegriffen wurde. Die Wahl des jeweiligen Polynoms orientierte sich zunächst am beobachteten Zuwachsverlauf. Grundsätzlich wurden verschiedene Polynome gerechnet. Auf der Basis eines varianzanalytischen Vergleichs sowie der Informationskriterien (AIC) konnte dann das Polynom mit der höchsten Anpassungsgüte an die beobachteten Werte ermittelt werden.

Um die Zuwachsentwicklung nach diesem Verfahren darstellen zu können, musste eine Variable für den zeitlichen Verlauf eingeführt werden. Der hier als „Zeit“ definierte Faktor wurde dann im Polynom verschlüsselt. Setzt man dieses Polynom wiederum in eine Wechselwirkung mit dem Faktor Schirm, können unmittelbar aus dem Schirmverlust resultierende Änderungen des Wachstumsverlaufs nachgewiesen und quantifiziert werden. Diesbezüglich ist anzumerken, dass die Variable „Zeit“ nicht das Kalenderjahr meint, sondern sich auf die einzelnen Messzeitpunkte innerhalb der Beobachtungsperiode bezieht. Diese beginnen stets bei  $\text{Zeit} = 0$  und sind fortlaufend nummeriert, was die Grundlage einer sinnvollen Berechnung des Intercept im Modell ist (FARAWAY 2006). Zur speziellen Prozedur

der gemischten linearen Modelle für Longitudinaldaten sei hier auf Kapitel 2.4.2 (S. 40) in Verbindung mit Kapitel 2.4.3 (S. 45) verwiesen.

Die Entwicklung der jährlichen Haupttrieblänge der Buchen ( $TL05\_12$ ) lässt sich für den Beobachtungszeitraum 2005–2012 am besten durch ein Polynom siebten Grades abbilden  $[(\beta_{1,i}) Zeit - (\beta_{7,o}) Zeit^7]$ . Für die Trieblänge an sich ist neben den von  $(\beta_{8,p})$  Schirm,  $(\beta_{11})$  Pflanzenzahl und  $(\beta_{10,q})$  Entwicklungsstadium ausgehenden Einzeleffekten auch die Interaktion Pflanzenzahl  $\times$  Schirm entscheidend. Daraus ergibt sich folgende Modellgleichung (11):

$$\begin{aligned}
 TL05\_12_{i...w} = & (\beta_0) Intercept + [(\beta_{1,i}) Zeit + (\beta_{2,j}) Zeit^2 + (\beta_{3,k}) Zeit^3 + (\beta_{4,l}) Zeit^4 + \\
 & (\beta_{5,m}) Zeit^5 + (\beta_{6,n}) Zeit^6 + (\beta_{7,o}) Zeit^7] \times (\beta_{8,p}) Schirm + (\beta_{8,p}) Schirm \times \\
 & (\beta_9) Pflanzenzahl + (\beta_{10,q}) Stadium + (b_{11,r}) Region + (b_{12,s}) Forstbetrieb + \\
 & (b_{13,t}) Revier + (b_{14,u}) Fläche + (b_{15,v}) Plot + \varepsilon_{ijklmnopqrstuvw}
 \end{aligned} \tag{11}$$

Dabei gibt  $(\beta_{1-10})$  die Modellkoeffizienten der festen Effekte an,  $(b_{11-15})$  die der zufälligen Effekte. Die Indizes  $(i-q)$  stehen für die Faktorstufen der festen Effekte,  $(r-v)$  für jene des Zufallsterms.  $\varepsilon$  repräsentiert die Reststreuung. Der Index  $w$  bezeichnet die Streuung auf Ebene des Einzelbaums. Eine signifikante Wechselwirkung des Polynoms mit dem Faktor Schirm bestätigt, dass im Zeitraum 2005–2012 eine durch den Schirmverlust bedingte Veränderung der Trieblängen feststellbar ist, sodass die Wachstumsverläufe der überschirmten und der freigestellten Buchen deutlich voneinander abweichen.

Eine sehr ausführliche Datenreihe stand für die Jahrringsequenz des Stamms und des stärksten Grünasts der Buchen zur Verfügung. Im Hinblick auf einen möglichst gleichmäßigen und statistisch belastbaren Stichprobenumfang aller Gruppen sowie die Zielstellung der Untersuchung erschien eine Beschränkung der Jahrringanalyse auf den Zeitraum 2000–2013 zweckmäßig. Der jährliche Radialzuwachs ( $ir00\_13$ ) ließ sich in diesem Zeitabschnitt am besten durch ein Polynom dritten Grades wiedergeben (12):

$$\begin{aligned}
 Boxcox(ir00\_13)_{i...s} = & (\beta_0) Intercept + [(\beta_{1,i}) Zeit + (\beta_{2,j}) Zeit^2 + (\beta_{3,k}) Zeit^3] \times \\
 & [(\beta_{4,l}) Schirm + (\beta_{5,m}) Stamm. Ast] + (\beta_6) Pflanzenzahl + \\
 & (\beta_{7,n}) Stadium + (b_{8,o}) Forstbetrieb + (b_{9,p}) Fläche + (b_{10,q}) Baum + \\
 & (b_{11,r}) Radius + \varepsilon_{ijklmnopqrs}
 \end{aligned} \tag{12}$$

Dabei steht  $(\beta_{l-7})$  für die Modellkoeffizienten der festen Effekte,  $(b_{8-11})$  für die der zufälligen Effekte. Die Indizes  $(i-s)$  sind in der für Gleichung (11) beschriebenen Weise zu interpretieren. Die Jahrringbreite (Response-Variable) musste Box-Cox-transformiert werden, um Normalverteilung und Homoskedastizität der Modellfehler herzustellen. Inhaltlicher Kern des Modells ist wiederum die bereits bekannte Wechselwirkung zwischen dem Polynom  $[(\beta_{1,i}) \text{Zeit} - (\beta_{3,k}) \text{Zeit}^3]$  als Zeitfaktor sowie dem  $(\beta_{4,l})$  Schirm. Dieser Term wurde hier zusätzlich um den Faktor  $(\beta_{5,m})$  Stamm.Ast erweitert. Letzterer definiert, ob ein Messwert zum Ast oder zum Stamm der Buche gehört. Demzufolge kann durch die Wechselwirkung nicht nur erklärt werden, inwiefern der jährliche Radialzuwachs auf einen sturmbedingten Schirmverlust reagiert, sondern auch, ob Unterschiede im Reaktionsverhalten von Stamm und stärkstem Grünast auftreten. Zu beachten ist die spezielle Schachtelung der Zufallseffekte in diesem Modell. Die kleinste Einheit, auf der Wiederholungen stattfinden, ist in diesem Fall der Radius, sodass auch dieser im Zufallsterm zu berücksichtigen ist. Daraus resultiert dessen vierfache Schachtelung  $[(b_{8,o}) \text{Forstbetrieb} - (b_{11,r}) \text{Radius}]$ .

Bezüglich der Interpretation der Modelle ist zu beachten, dass die gewählten Polynome lediglich als Hilfsmittel dienen, um die beobachteten Wachstumsverläufe mit mathematischen Methoden zu beschreiben. Deren Gültigkeit beschränkt sich ausschließlich auf die jeweils dargestellten, mit dem Freistellungsereignis in Verbindung stehenden Zeitabschnitte. Die Modelle können folglich nicht als ökologisch begründbare oder gar verallgemeinerbare Wachstumsfunktionen erhalten, sodass eine Extrapolation ausdrücklich nicht möglich ist.

### **3.4 Ergebnisse**

#### **3.4.1 Zustandsgrößen des Baumwachstums**

Um den Effekt des sturmbedingten Schirmverlusts quantifizieren zu können, sind auf den Freistellungstermin bezogene Zustandsdaten zum Baumwachstum vonnöten. Für diese Arbeit sind namentlich die Buchenhöhen nach der Vegetationszeit 2006 von Interesse. Sie geben einerseits Auskunft über die Entwicklungsbedingungen unter dem bis dato in allen Beständen vorhandenen Fichtenschirm und damit über die Vergleichbarkeit der Untersuchungsflächen. Andererseits bilden sie die Grundlage für eine Quantifizierung aller bis zur Datenaufnahme im Herbst 2012 eingetretenen Wachstumsreaktionen. Einen Überblick über die anhand der Triebblängenrückmessung für das Jahr 2006 ermittelten Buchenhöhen gibt Tabelle 10. Demnach waren die Buchenjungwüchse (vor Dickungsschluss) zu diesem Zeitpunkt etwa 2,0 m hoch, während die Voranbauten im Dickungsstadium bereits Höhen über 4,0 m

aufwiesen. Erwartungsgemäß konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Schirmstraten festgestellt werden, was auch das gemischte Modell bestätigte (Tabelle 11). Der mittlere Höhenunterschied betrug demnach nur 0,13 m ( $p = 0,4744$ ), was als Beweis für die bis dato sehr ähnlichen Wuchsbedingungen gelten kann. Die Dichte des Voranbaus, ausgedrückt in der Pflanzenzahl pro Hektar, zeigt einen geringen, jedoch höchst signifikanten Effekt auf die Buchenhöhen. Diese steigen infolge der zunehmenden Pflanzendichten stetig an, wobei ein Plus von 1.000 St./ha die Baumhöhen um ca. 0,11 m vergrößert ( $p = 0,0001$ ). Diese Beziehung gilt unabhängig vom Entwicklungsstadium der Voranbauten. Wie bereits anhand der gemessenen Werte gezeigt wurde, erreichen die Buchen im Dickungsstadium deutlich größere Höhen als die Verjüngungen vor Dickungsschluss. Mit 1,36 m ist dieser Unterschied auch im Modell höchst signifikant ( $p = 0,0000$ ).

**Tabelle 10:** Deskriptive Statistik zu den nach Abschluss der Vegetationszeit 2006 erreichten Buchenhöhen. Die Werte ergeben sich aus den im Herbst 2012 erhobenen Höhen abzüglich der für die Jahre 2007–2012 zurückgemessenen Haupttrieblängen.

Entwicklungsstadium	Schirm	Ø Höhe 2006 [m]	SD [m]
vor Dickungsschluss	Freistellung	1,97	0,73
	Schirm	2,12	0,84
nach Dickungsschluss	Freistellung	4,09	1,46
	Schirm	4,25	1,23

Sechs Vegetationsperioden nach dem Schirmverlust haben die Buchen ihre Höhe in allen Varianten spürbar ausgebaut, wobei trotz der Freistellung keine klare Differenzierung zwischen freigestellten Voranbauten und solchen unter Schirm konstaterbar ist. Allerdings lässt sich bereits anhand des Intercept von  $\beta_0 = 3,68447$  der Höhenunterschied gegenüber dem Jahr 2006 ( $\beta_0 = 1,87245$ ) ablesen. Wird eine mittlere Pflanzendichte von 6.000 St./ha vorausgesetzt, sind die Buchen vor Dickungsschluss auf den Sturmflächen nun 5,30 m groß und damit 2,77 m höher als noch vor sechs Jahren. Wie das statistische Modell belegt, wirken sich nach wie vor nur Pflanzendichte und Entwicklungsstadium als Einzeleffekte höchst signifikant auf die Höhe aus, während der Schirm lediglich in Wechselwirkung mit der Pflanzenzahl von signifikanter Bedeutung ist (Tabelle 11). Diese Wechselbeziehung bringt zum Ausdruck, dass eine Erhöhung der Bestandesdichte bei freigestellten Voranbauten zu einer deutlich intensiveren Wachstumssteigerung führt, als dies unter Schirm der Fall ist. Die Parameterschätzer der Pflanzenzahl geben den Anstieg der Modellgeraden wieder und dokumentieren dies mit  $\beta_2 = 0,00027$  für Buchen auf Sturmflächen bzw.  $\beta_2 = 0,00010$  [ $\beta_2 - (\beta_1 \times \beta_2)$ ] unter Schirm. Eine Höhendifferenzierung zugunsten der Voranbauten auf



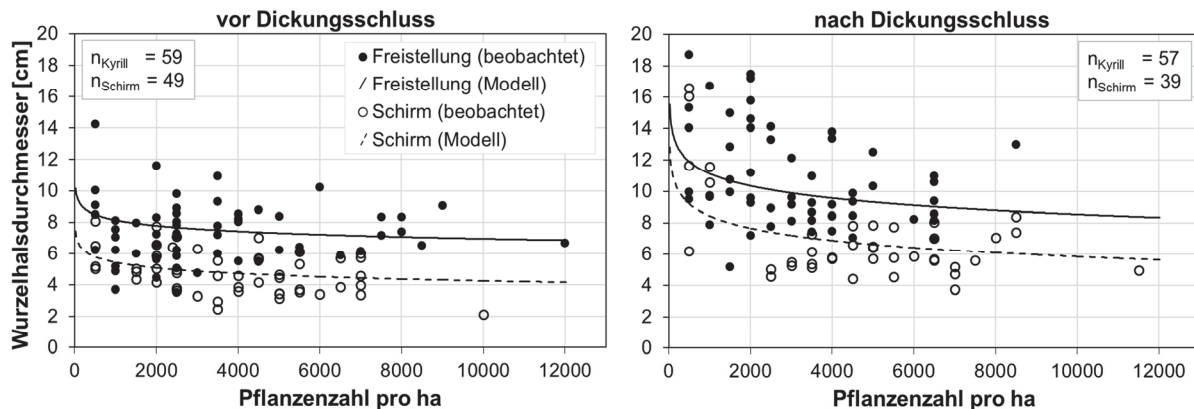
Sturmflächen tritt aber erst ab 4.000 St./ha ein, was durch die größeren Ausgangswerte unter Schirm begründet ist ( $\beta_I = 0,65594$ ).

**Tabelle 11:** Ergebnisse der linearen gemischten Modelle (LMM) zur Schätzung der Wachstumsgrößen der Buchen in Abhängigkeit von Schirm, Pflanzenzahl und Entwicklungsstadium des Voranbaus. Das Intercept bezieht sich auf freigestellte Voranbauten vor Dickungsschluss.

feste Effekte		Modell-schätzung	Standard-fehler	p-Wert
Höhe 2006 in [m] nach (Formel 7)				
$\beta_0$	Intercept	1,87245	0,2919	<b>0,0000***</b>
$\beta_1$	Schirm	0,13319	0,1858	0,4744
$\beta_2$	Pflanzenzahl pro Hektar	0,00011	< 0,0001	<b>0,0001***</b>
$\beta_3$	Entwicklungsstadium	1,36045	0,2549	<b>0,0000***</b>
Höhe 2012 in [m] nach (Formel 8)				
$\beta_0$	Intercept	3,68447	0,4251	<b>0,0000***</b>
$\beta_1$	Schirm	0,65594	0,3878	0,0926
$\beta_2$	Pflanzenzahl pro Hektar	0,00027	< 0,0001	<b>0,0000***</b>
$\beta_3$	Entwicklungsstadium	1,70016	0,3000	<b>0,0000***</b>
$\beta_1 \times \beta_2$	Schirm $\times$ Pflanzenzahl pro Hektar	-0,00017	0,0001	<b>0,0198*</b>
Wurzelhalsdurchmesser 2012 in [cm] nach (Formel 9)				
$\beta_0$	Intercept	11,68537	1,7562	<b>0,0000***</b>
$\beta_1$	Schirm	-2,69575	0,3791	<b>0,0000***</b>
$\beta_2$	Pflanzenzahl pro Hektar	-0,51411	0,2035	<b>0,0124*</b>
$\beta_3$	Entwicklungsstadium	7,24038	3,3655	<b>0,0329*</b>
$\beta_2 \times \beta_3$	Pflanzenzahl $\times$ Entwicklungsstadium	-0,61384	0,4016	0,1283
H/D-Wert 2012 in [m/cm] nach (Formel 10)				
$\beta_0$	Intercept	0,49882	0,0241	<b>0,0000***</b>
$\beta_1$	Schirm	0,32520	0,0282	<b>0,0000***</b>
$\beta_2$	Pflanzenzahl pro Hektar	$4,42 \times 10^{-5}$	< 0,0001	<b>0,0000***</b>
$\beta_3$	Entwicklungsstadium	0,03086	0,0285	0,2803

Das Durchmesserwachstum profitiert im Vergleich zur Höhe offenbar wesentlich stärker von einer Freistellung; das bekunden die im Jahr 2012 erhobenen *Wurzelhalsdurchmesser*. Innerhalb von nur sehr Jahren hat sich eine deutliche und höchst signifikante Differenzierung zugunsten der Buchen auf Sturmflächen eingestellt (Abbildung 20). Bei mittleren Pflanzendichten von 6.000 St./ha werden im Stadium vor Dickungsschluss auf den KYRILL-Flächen Durchmesser von 7,21 cm erzielt, während die Buchen unter Schirm nur 4,52 cm stark sind. Das statistische Modell beweist nachdrücklich, dass der Schirm von den einbezogenen Faktoren die größte Wirkung auf den Wurzelhalsdurchmesser ausübt ( $\beta_I = -2,69575$ ). Diese Beziehung gilt gleichermaßen auch im Dickungsstadium, wobei die Werte dort unabhängig von der Überschirmung signifikant höher sind ( $\beta_3 = 7,24038$ ). Im genannten Stammzahlbereich beträgt der Unterschied zwischen den Entwicklungsstadien ca. 1,90 cm. Mit zunehmender Bestandesdichte tritt eine signifikante Durchmesserreduktion ein, welche

einer logarithmisch fallenden Funktion folgt. Die größte Dynamik dieses Prozesses findet also im unteren Stammzahlbereich statt, sodass der Effekt einer zusätzlichen Pflanzenzahlerhöhung mit zunehmender Bestandesdichte nachlässt. Tendenziell ist die Durchmesserdifferenzierung im Dickungsstadium deutlicher ausgeprägt, wobei keine signifikante Wechselbeziehung zwischen Pflanzenzahl und Entwicklungsstadium vorliegt. Im Rahmen den untersuchten Bestandesbedingungen bleibt die Bedeutung der Pflanzenzahl für den Durchmesser der Buchen insgesamt klar hinter jener des Schirms zurück.

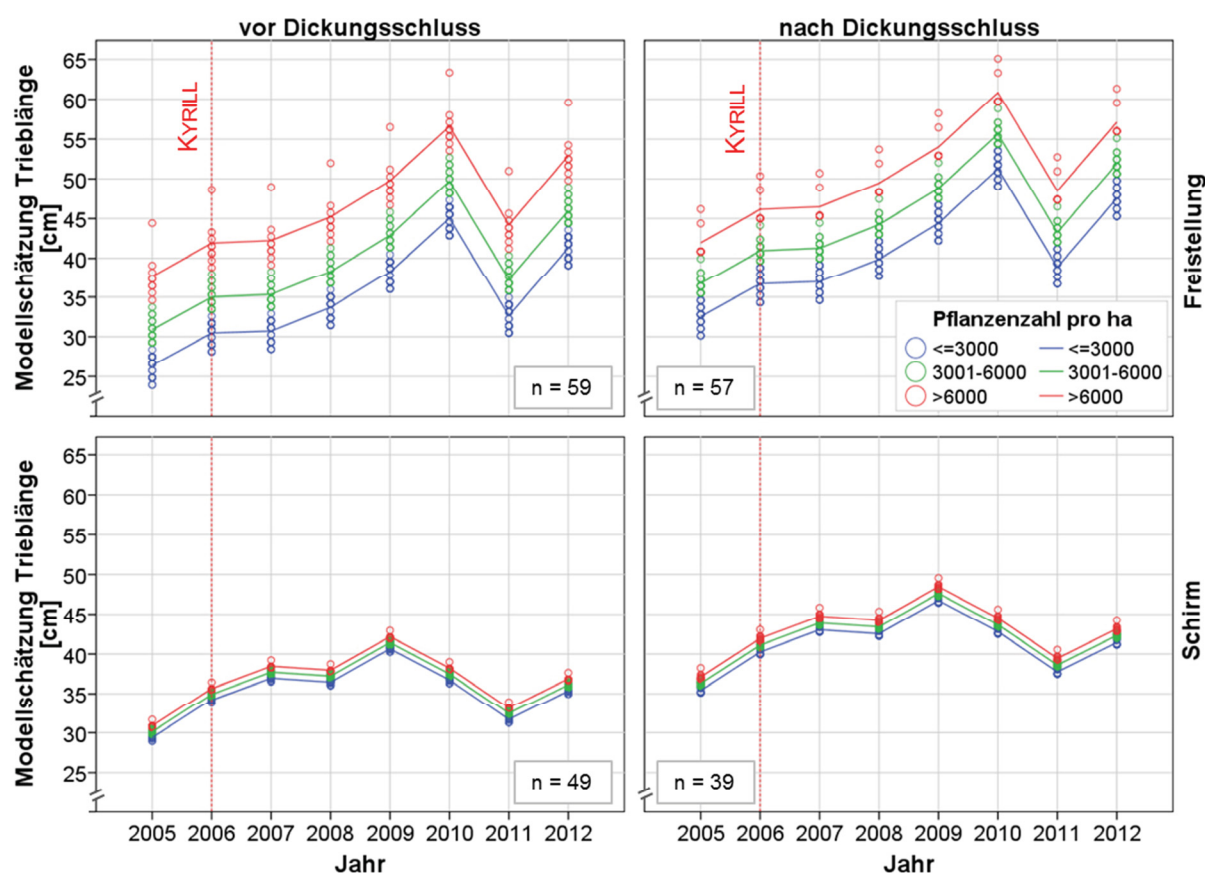


**Abbildung 20:** Wurzelhalsdurchmesser der Buchen im Jahr 2012 in Abhängigkeit von der Pflanzenzahl pro Hektar, getrennt nach Entwicklungsstadium und Überschirmung.

Im Vergleich zu den einfließenden Wachstumsgrößen Baumhöhe und Wurzelhalsdurchmesser im Jahr 2012 weist der *H/D-Wert* der Buchen eine wesentlich geringere Streuung auf und lässt sehr klare Trends hinsichtlich der Untersuchungsfaktoren erkennen. Als Erstes fällt erneut der Effekt des Schirmverlusts auf, welcher eine deutliche Verringerung des H/D-Verhältnisses bewirkt (Tabelle 11). Gemäß dem statistischen Modell betragen die Werte im Stadium vor Dickungsschluss 0,74 auf den Sturmflächen bzw. 1,06 unter Fichtenschirm ( $\beta_1 = 0,32520$ ), wobei mittlere Pflanzenzahlen von 6.000 St./ha zugrunde liegen. Die Freistellung führte also innerhalb von nur sechs Jahren zu einer höchst signifikanten Senkung des Schlankheitsgrads der Buchen. Darüber hinaus ist die Pflanzendichte im Voranbau von höchst signifikanter Relevanz. Unabhängig von der Überschirmung steigen die H/D-Werte mit der Pflanzenzahl an, wobei eine Stammzahlerhöhung um 5.000 St./ha den Schlankheitsgrad um 0,28 anhebt ( $\beta_2 = 4,42 \times 10^{-5}$ ). Die beschriebenen Wirkungsmechanismen von Schirm und Pflanzendichte gelten unabhängig vom Entwicklungsstadium der Voranbauten. Im Dickungsstadium waren nur unbedeutend und folglich nicht signifikant höhere H/D-Werte zu verzeichnen ( $\beta_3 = 0,03086$ ).

### 3.4.2 Reaktion des Längenzuwachses nach Freistellung

Die Gesamthöhe der Buchen ist das Produkt aller Umweltfaktoren, die seit ihrer Etablierung auf sie eingewirkt haben. In Relation dazu repräsentiert die Phase seit dem Schirmverlust im Januar 2007 nur einen vergleichsweise kurzen Lebensabschnitt, welcher allerdings durch eine drastische Änderung der abiotischen Wuchsbedingungen für die noch jungen Bäumchen gekennzeichnet ist und sich dadurch klar von der vorangegangenen Überschirmungsphase abgrenzt. Um möglicherweise durch die Freistellung initiierte Reaktionen des Längenwachstums quantifizieren zu können, werden nun explizit die acht Vegetationsperioden 2005–2012 herausgegriffen und dahin gehend analysiert (Abbildung 21).



**Abbildung 21:** Modellschätzung der jährlichen Haupttrieblängen in der Periode 2005–2012 nach Formel (11). Die Darstellung erfolgt getrennt nach Entwicklungsstadium und Überschirmung. Die Pflanzenzahlen pro Hektar wurden zugunsten einer übersichtlichen Darstellung klassifiziert. Die Kennzeichnung „KYRILL“ markiert den Zeitpunkt des Schirmverlusts im Januar 2007.

Der im Zeitraum 2005–2012 an den Buchen beobachtete Wachstumsverlauf kann über das gewählte Polynom siebten Grades  $[(\beta_1) \text{ Zeit} - (\beta_7) \text{ Zeit}^7]$  sehr genau abgebildet werden, wie durch dessen ausnahmslos (hoch) signifikante Parameter im Modell bestätigt wird (Tabelle 12). Bei näherer Betrachtung der visualisierten Modellschätzung in Abbildung 21 fallen die voneinander abweichenden Wachstumskurven von freigestellten und überschirmten Buchen auf. Dabei sind zwei Phase zu unterscheiden: (1) In den beiden Jahren vor und auch

in der ersten Vegetationsperiode nach KYRILL (2005–2007) präsentieren sich die Kurvenverläufe überschirmter und freigestellter Buchen sehr ähnlich. Die Triebblängen betragen in dieser Phase etwa 30–40 cm pro Jahr im Stadium vor Dickungsschluss. Die von der Pflanzenzahl abhängige Differenzierung in der Freistellungsvariante ist dem Modellansatz geschuldet. Tatsächlich ist eine Wirkung der Freistellung bis dato nicht erkennbar. (2) Beginnend im Jahr 2008 stellt sich eine zunehmende Differenzierung ein. In Bezug auf die Buchen auf Sturmflächen ist eine schwache, aber stete Zunahme der Triebblängen zu verzeichnen, welche 2010 ein Maximum erreicht. In diesem Jahr zeigen sich auch erstmals merkliche Unterschiede zwischen den Höhentrieben beider Varianten. In Abhängigkeit von der Pflanzendichte sind hier mittlere Zuwächse zwischen 45 cm und 57 cm im Stadium vor Dickungsschluss zu verzeichnen. Im Vergleich dazu liegen die Werte unter Schirm nach wie vor bei 36–39 cm. Die Buchen im Dickungsstadium erreichen grundsätzlich um etwa 6 cm größere Triebblängen ( $\beta_I = 6,2530$ ). Zwar zeigen auch die Voranbauten unter Schirm geringfügige zwischenjährliche Variationen, im Mittel sind die Zuwächse aber über die gesamte Periode hinweg deutlich ausgeglichener als auf der Freifläche. Auffällig ist der starke Zuwachseinbruch im Jahr 2011, welcher zwar bei allen Varianten eintritt, bei den freigestellten Buchen jedoch am massivsten ausfällt. Im darauffolgenden Jahr erreichen die Triebblängen wieder annähernd das Niveau von 2010.

Aus dem beobachteten Wachstumsverlauf ist abzuleiten, dass junge Buchen auf eine plötzliche Freistellung mit einer Steigerung ihres Längenwachstums reagieren, welche jedoch erst in der zweiten Vegetationsperiode nach dem Schirmverlust einsetzt. Der hoch signifikante Schirmeffekt im Modell bestätigt die geringe, aber dennoch evidente Triebblängenzunahme (Tabelle 12), welche anhand der absoluten Höhen im Jahr 2012 nicht nachweisbar war.

Etwas komplexer – und dadurch nicht isoliert von weiteren Bestandesbedingungen im Voranbau zu interpretieren – ist die Beziehung zwischen Trieblänge und Pflanzendichte. Prinzipiell ist der Längenzuwachs positiv mit der Stammzahldichte im Voranbau korreliert. Wie die hoch signifikante Wechselbeziehung ( $\beta_8$ ) Schirm  $\times$  ( $\beta_9$ ) Pflanzenzahl belegt, gilt dies in bedeutendem Umfang aber ausschließlich für freigestellte Voranbauten ( $\beta_9 = 0,0018$ ), während sich unter Schirm nur eine marginale Differenzierung einstellt [ $(\beta_9) - (\beta_8 \times \beta_9) = 0,0003$ ]. Demzufolge unterscheiden sich die Triebblängen unter Fichtenschirm bei Pflanzenzahlen von 2.000 St./ha bzw. 12.000 St./ha gerade einmal um 3 cm, während die Zuwachsdifferenz der freigestellten Buchen etwa 18 cm beträgt. Schirm und Pflanzenzahl

stehen folglich in einer engen Wechselbeziehung zueinander, sodass die zuwachsfördernde Wirkung hoher Pflanzendichten erst in vollem Umfang zutage tritt, wenn die Buchen ohne Überschirmung aufwachsen.

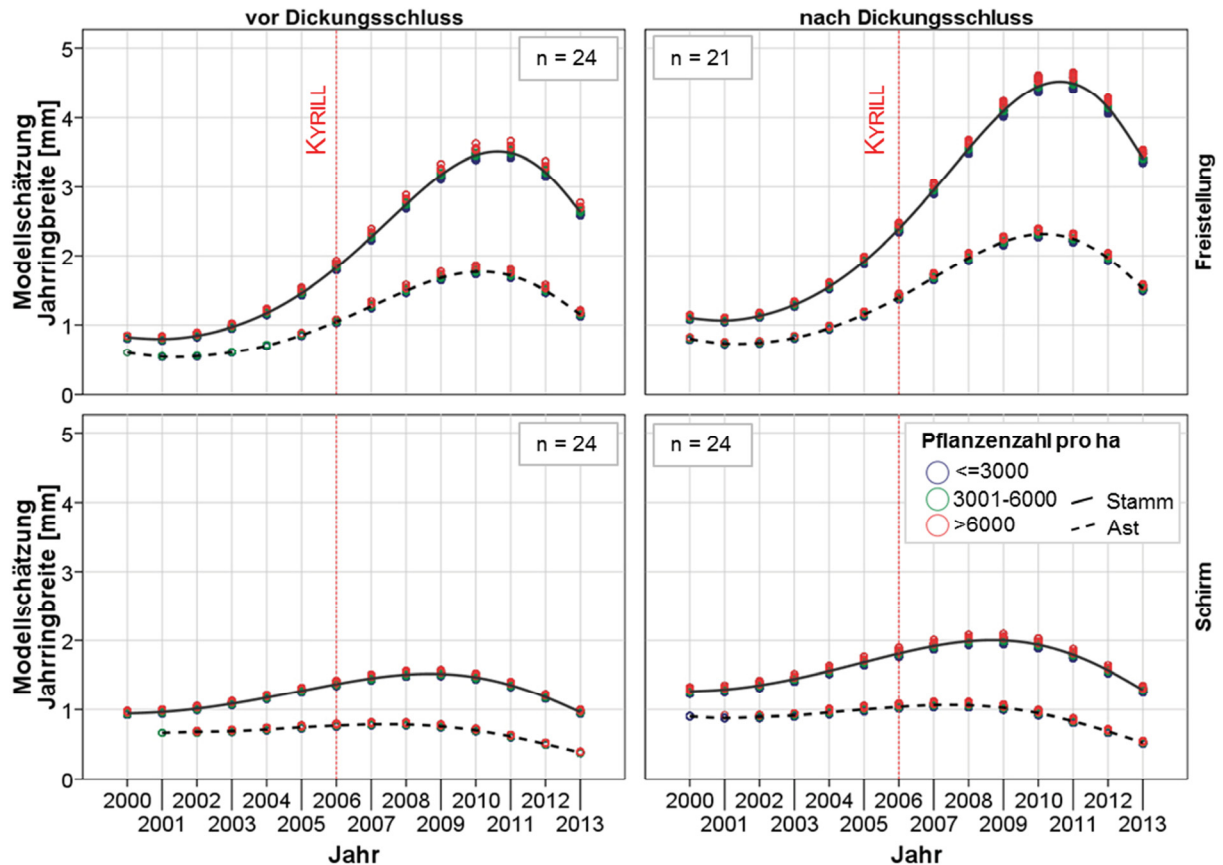
**Tabelle 12:** Ergebnisse des linearen gemischten Modells (LMM) zur Schätzung der jährlichen Haupttrieblänge der Buchen in der Periode 2005–2012 in Abhängigkeit von Schirm, Pflanzenzahl und Entwicklungsstadium des Voranbaus (Formel 11). Das Intercept bezieht sich auf freigestellte Voranbauten vor Dickungsschluss.

	feste Effekte	Modellschätzung	Standardfehler	p-Wert
$\beta_0$	Intercept	-184,0834	88,6890	<b>0,0381*</b>
$\beta_1$	Zeit	509,4268	216,8911	<b>0,0190*</b>
$\beta_2$	Zeit <sup>2</sup>	-482,4640	202,1974	<b>0,0172*</b>
$\beta_3$	Zeit <sup>3</sup>	235,6052	95,3580	<b>0,0136*</b>
$\beta_4$	Zeit <sup>4</sup>	-64,7682	24,9959	<b>0,0097**</b>
$\beta_5$	Zeit <sup>5</sup>	10,1096	3,6875	<b>0,0062**</b>
$\beta_6$	Zeit <sup>6</sup>	-0,8336	0,2862	<b>0,0036*</b>
$\beta_7$	Zeit <sup>7</sup>	0,0281	0,0091	<b>0,0020**</b>
$\beta_8$	Schirm	446,1733	134,4246	<b>0,0011**</b>
$\beta_9$	Pflanzenzahl	0,0018	0,0003	<b>0,0000***</b>
$\beta_{10}$	Entwicklungsstadium	6,2530	1,7609	<b>0,0005***</b>
$\beta_1 \times \beta_8$	Zeit $\times$ Schirm	-1098,6994	329,2080	<b>0,0009***</b>
$\beta_2 \times \beta_8$	Zeit <sup>2</sup> $\times$ Schirm	1047,2878	306,9327	<b>0,0007***</b>
$\beta_3 \times \beta_8$	Zeit <sup>3</sup> $\times$ Schirm	-505,9058	144,7655	<b>0,0005***</b>
$\beta_4 \times \beta_8$	Zeit <sup>4</sup> $\times$ Schirm	136,1099	37,9503	<b>0,0003***</b>
$\beta_5 \times \beta_8$	Zeit <sup>5</sup> $\times$ Schirm	-20,6369	5,5991	<b>0,0002***</b>
$\beta_6 \times \beta_8$	Zeit <sup>6</sup> $\times$ Schirm	1,6459	0,4346	<b>0,0002***</b>
$\beta_7 \times \beta_8$	Zeit <sup>7</sup> $\times$ Schirm	-0,0536	0,0138	<b>0,0001***</b>
$\beta_8 \times \beta_9$	Schirm $\times$ Pflanzenzahl	-0,0015	0,0005	<b>0,0016**</b>

Dass die Wechselbeziehung zwischen Polynom  $[(\beta_1) \text{ Zeit} - (\beta_7) \text{ Zeit}^7]$  und dem Faktor  $(\beta_8)$  Schirm in allen Parametern des Modells höchst signifikante Ergebnisse liefert, beweist unmissverständlich, dass die im Zeitraum von 2005–2012 beobachtete Zuwachsreaktion der Buchen auf den Sturmflächen eine unmittelbare Konsequenz des Schirmverlusts sein muss.

### 3.4.3 Reaktion des Radialzuwachses nach Freistellung

Mithilfe der Jahrringanalyse konnte eine Zuwachschronologie für Stamm und stärksten Grünast der Buchen in der Periode von 2000-2013 erstellt werden. Im gemischten Modell wurde die beobachtete zeitliche Abfolge der Jahrringbreiten dann durch ein Polynom dritten Grades abgebildet (Abbildung 22). Dieses eignet sich sehr gut, um die Zuwachsentwicklung im gewählten Zeitabschnitt mathematisch zu beschreiben, wie aus den höchst signifikanten p-Werten aller Polynomparameter  $[(\beta_1) \text{ Zeit} - (\beta_3) \text{ Zeit}^3]$  hervorgeht (Tabelle 13).



**Abbildung 22:** Modellschätzung der Jahrringbreiten an Stamm und stärkstem Grünast der Buchen in der Periode 2000–2013 nach Formel (12). Die Darstellung erfolgt getrennt nach Entwicklungsstadium und Überschirmung. Die Pflanzenzahlen pro Hektar wurden zugunsten einer übersichtlichen Darstellung in drei Klassen eingeteilt. Die Kennzeichnung „KYRILL“ markiert den Zeitpunkt des Schirmverlusts im Januar 2007.

Laut der Modellschätzung leisten Buchen unter locker-lichtem Fichtenschirm über die gesamte Periode hinweg relativ ausgeglichene Radialzuwächse von 1,0–1,50 mm/a, nur im Dichtungsstadium werden bis zu 2,00 mm/a erreicht. Der jeweils stärkste Grünast zeigt einen dem Stamm sehr ähnlichen Jahrringbreitenverlauf, jedoch auf signifikant niedrigerem Niveau ( $\beta_5 = -0,48823$ ). Die Werte betragen hier im Mittel 0,70 mm/a bzw. 1,00 mm/a. Ausschließlich in der Periode vor Schirmverlust gilt das beschriebene Wuchsverhalten auch für die später freigestellten Voranbauten, sodass nicht generell ein signifikanter Unterschied zwischen den Faktorstufen des Schirms besteht ( $p = 0,1066$ ). Allerdings setzt nach der Freistellung unverzüglich eine über mehrere Jahre hinweg kontinuierlich anhaltende Zuwachssteigerung ein. Dadurch werden in der vierten und fünften Vegetationsperiode nach dem Sturm maximale Jahrringe von 3,60 mm/a vor Dichtungsschluss bzw. 4,72 mm/a nach Dichtungsschluss erzielt. Im Vergleich zur Situation vor dem Orkan KYRILL entspricht das einer durchschnittlichen Zuwachserhöhung um ca. 200–250 %, die innerhalb von vier Jahren realisiert wurde. In den Folgejahren 2012 und 2013 sind die Jahrringbreiten dann wieder rückläufig. Wie die (höchst) signifikante Wechselwirkung  $[(\beta_1) \text{ Zeit} -$



$(\beta_3) \text{Zeit}^3] \times (\beta_4) \text{Schirm}$  im Modell beweist, ist die aufgezeigte Zuwachssteigerung eine unmittelbare Konsequenz des Schirmverlusts über den Buchen.

Beim jeweils stärksten Grünast waren Reaktionsmuster zu beobachten, die mit denen des Stamms nahezu identisch waren. Die Jahrringbreiten erreichten hier in den Jahren 2010 und 2011 durchschnittlich 1,84 mm/a vor Dickungsschluss und 2,46 mm/a im Dickungsstadium. Das entspricht etwa 50 % des Stammzuwachses. In Relation zu den Ausgangswerten vor KYRILL beträgt die Zuwachssteigerung des stärksten Grünasts etwa 140–160 % und bleibt damit etwas hinter jener des Stamms zurück. Grundsätzlichen reagiert der Radialzuwachs von Stamm und stärkstem Grünast unter den vorliegenden Bestandesbedingungen jedoch nahezu synchron auf die plötzliche Freistellung. Dies wird auch durch das statistische Modell untermauert, denn die Wechselwirkung  $[(\beta_1) \text{Zeit} - (\beta_3) \text{Zeit}^3] \times (\beta_5) \text{Stamm.Ast}$  ist in keinem Parameter signifikant.

**Tabelle 13:** Ergebnisse des linearen gemischten Modells (LMM) zur Schätzung der Jahrringbreiten an Stamm und stärkstem Grünast der Buchen in der Periode 2000–2013 in Abhängigkeit von Schirm, Pflanzenzahl und Entwicklungsstadium des Voranbaus (Formel 12). Das Intercept bezieht sich auf freigestellte Voranbauten im Entwicklungsstadium vor Dickungsschluss. Die Modellschätzungen sind Box-Cox transformiert.

	feste Effekte	Modellschätzung	Standardfehler	p-Wert
$\beta_0$	Intercept	5,00662	0,2460	<b>0,0000***</b>
$\beta_1$	Zeit	–0,21933	0,0615	<b>0,0004***</b>
$\beta_2$	Zeit <sup>2</sup>	0,09337	0,0094	<b>0,0000***</b>
$\beta_3$	Zeit <sup>3</sup>	–0,00542	0,0004	<b>0,0000***</b>
$\beta_4$	Schirm	0,21553	0,1329	0,1066
$\beta_5$	Stamm.Ast	–0,48823	0,1527	<b>0,0016**</b>
$\beta_6$	Pflanzenzahl pro Hektar	0,00001	< 0,0001	0,5484
$\beta_7$	Entwicklungsstadium	0,46294	0,2398	0,0823
$\beta_1 \times \beta_4$	Zeit $\times$ Schirm	0,14360	0,0500	<b>0,0041*</b>
$\beta_2 \times \beta_4$	Zeit <sup>2</sup> $\times$ Schirm	–0,06144	0,0085	<b>0,0000***</b>
$\beta_3 \times \beta_4$	Zeit <sup>3</sup> $\times$ Schirm	0,00302	0,0004	<b>0,0000***</b>
$\beta_1 \times \beta_5$	Zeit $\times$ Stamm.Ast	0,08123	0,0640	0,2047
$\beta_2 \times \beta_5$	Zeit <sup>2</sup> $\times$ Stamm.Ast	–0,00280	0,0099	0,7774
$\beta_3 \times \beta_5$	Zeit <sup>3</sup> $\times$ Stamm.Ast	0,00015	0,0005	0,7488

Einzeleffekte von Schirm und Pflanzendichte im Voranbau konnten statistisch ebenso wenig nachgewiesen werden wie eine Bedeutung des Entwicklungsstadiums für den Radialzuwachs. Zwar ist bei Letzterem eine Tendenz zu leicht erhöhten Jahrringbreiten im Dickungsstadium erkennbar, die vor allem in der Freistellungsphase auffällt. Diese konnte statistisch aber nicht abgesichert werden.

### 3.5 Diskussion

#### 3.5.1 Methoden zur Analyse der Wachstumsreaktion

Soll die Zuwachsreaktion junger Buchen wenige Jahre nach einer plötzlichen Umweltänderung analysiert und interpretiert werden, muss zwischen statischen Zustandsgrößen und dynamischen Zuwachsgrößen unterschieden werden. Aufgrund des jährlichen Erhebungsturnus spiegeln Letztere immer das aktuelle Wachstum wider. Dadurch besitzen sie eine hohe Sensibilität gegenüber Umwelteinflüssen sowie eventuellen Änderungen in diesem Bereich und eignen sich sehr gut für die Analyse kurzfristiger Wachstumsreaktionen. Zustandsgrößen dagegen resultieren aus der Summe aller Wachstumsprozesse während des Baumlebens und weisen speziell im Kontext der vorliegenden Arbeit einen entscheidenden Nachteil auf. Erst kürzlich eingetretene Zuwachsänderungen sind sehr schwer feststellbar, da sie keine unmittelbar sichtbaren Auswirkungen auf die Zustandsgrößen haben. So konnte beispielsweise sechs Jahre nach dem Schirmverlust kein signifikanter Effekt der Freistellung auf die Höhe der Buchen nachgewiesen werden. Die jährliche Haupttrieblänge zeigte dagegen eine ganz offensichtliche positive Reaktion. Auch frühere Arbeiten bestätigen den Vorteil dynamischer Parameter in diesem Zusammenhang. So konnte die Vorhersagegenauigkeit von Modellen zu Wachstumsreaktionen der Douglasie [*Pseudotsuga menziesii* var. *menziesii* (Mirb.) FRANCO] auf verschiedene Standortbedingungen und waldbauliche Behandlungen durch Berücksichtigung des spezifischen Astwachstums erheblich verbessert werden (WEISKITTEL ET AL. 2007). Dynamische Parameter in Form periodischer Zeitreihen sind folglich ein adäquates Mittel, um (kurzfristige) Wachstumsänderungen präzise abzubilden.

Bei der Analyse solcher Longitudinaldaten ist zu beachten, dass der von einer Buche im aktuellen Jahr geleistete Zuwachs nicht losgelöst von dem der Vorjahre betrachtet werden darf. Demzufolge sind die zeitlich wiederholten Messwerte eines Individuums im statistischen Sinn nicht unabhängig voneinander, sodass von korrelierten Messwertfehlern ausgegangen werden muss (FITZMAURICE ET AL. 2011; DORMANN 2012). Grundlage der regressionsanalytischen Modellierung von Longitudinaldaten sind darum statistische Methoden, die eine zeitliche Autokorrelation identifizieren und gegebenenfalls auch korrigieren können. Die angewendeten Verfahren linearer gemischter Modelle erreichen dies mittels spezifischer Korrelationsfunktionen, durch die die Voraussetzung (zeitlich) unkorrelierter Messwertfehler im Modell hergestellt wird (PINHEIRO & BATES 2000; VENABLES & RIPLEY 2002).

Zur Abbildung des Zuwachsverlaufs über die Zeit dienen Polynome. Derartige Funktionen sind von Vorteil, wenn in einem definierten Zeitabschnitt eine mehr oder minder abrupte Änderung des Zuwachsverhaltens der Bäume zu erwarten ist, welche mathematisch beschrieben werden soll. Einfache lineare Beziehungen sind hierfür nicht geeignet, da sie zwar Auskunft über den allgemeinen, langfristigen Wachstumstrend geben, zwischenzeitliche Variationen jedoch geglättet werden und folglich nicht zum Vorschein kommen. Hinsichtlich der Interpretation der Polynome ist zu beachten, dass diese lediglich mathematische Hilfsmittel sind, sodass sich ihre Gültigkeit ausschließlich auf die jeweils dargestellten, mit dem Freistellungsereignis in Verbindung stehenden Zeitabschnitte beschränkt. Die Modelle können folglich nicht als ökophysiologisch begründbare oder gar verallgemeinerbare Wachstumsfunktionen herangezogen werden. Eine Extrapolation ist somit ausdrücklich nicht möglich.

Namentlich das Modell zur Haupttrieblänge der Buchen (Formel 11) ist mit 15 festen sowie fünf zufälligen Effekten durch eine Fülle von Parametern charakterisiert, was maßgeblich auf das enthaltene Polynom zurückzuführen ist. Liegen wie in diesem Fall sehr viele potenzielle Prädiktoren vor, ist ein schrittweiser Vergleich verschiedener Modellkonstellationen zu empfehlen (THIELE & MARKUSSEN 2012), welcher darauf ausgerichtet ist, ein geeignetes Modell von möglichst geringer Komplexität zu identifizieren. Zwar liefert ein vollständiges Modell den geringsten Bias, führt aber nicht zwangsläufig zur besten Vorhersage, da oft unbedeutende Faktoren enthalten sind und das Modell überparametrisiert ist (WHITTINGHAM ET AL. 2006; THIELE & MARKUSSEN 2012). In der vorliegenden Arbeit wurde dieser Problematik durch eine schrittweise Modellselektion Rechnung getragen. Das Basismodell wurde dabei nach und nach um einzelne Faktoren bzw. Polynomgrade erweitert bzw. reduziert. Anschließend erfolgte ein Vergleich von überarbeitetem und ursprünglichem Modell. Als Maß einer Verbesserung der Modellgüte diente neben dem p-Wert der ANOVA (F-Test) vor allem das AKAIKE-Informationskriterium (AIC). Das Konzept des AIC geht davon aus, dass ein statistisches Modell nicht komplexer als unbedingt nötig sein sollte (HEDDERICH & SACHS 2012). Demzufolge werden dessen Anpassungsgüte an die empirischen Daten (Streuung) sowie die Komplexität, gemessen an der Zahl der einbezogenen Parameter, ausbalanciert (BOLKER ET AL. 2008; THIELE & MARKUSSEN 2012). Die Anzahl der Parameter wird dabei „strafend“ berücksichtigt, wodurch komplexere Modelle nicht grundsätzlich bevorzugt werden. Das AIC ist demnach ein Algorithmus, der nach einer stimmigen Beschreibung der beobachteten Daten durch ein Modell mit möglichst wenigen, dafür aber

elementaren Parametern sucht und so ein ausgewogenes Verhältnis zwischen der Vernachlässigung wichtiger Modelleffekte („Underfit“) und der Überparametrisierung („Overfit“) anstrebt (PINHEIRO & BATES 2000; HEDDERICH & SACHS 2012). Alle in der vorliegenden Arbeit dargestellten Modelle wurden nach dieser Methode entwickelt. Speziell für das Triebblängenmodell konnte dank der Erweiterung des Polynoms bis zum siebten Grad eine konsequente AIC-Senkung beobachtet werden. Das bestätigt, dass die Güte der Modellvorhersage trotz ansteigender Komplexität verbessert werden konnte, und unterstützt die Wahl des verwendeten Modellansatzes.

### **3.5.2 Höhenwachstum**

Die Zustandsgröße Baumhöhe zeigte weder 2006 noch 2012 eine Abhängigkeit vom Untersuchungsfaktor Schirm. Das bedeutet jedoch nicht, dass der Fichtenschirm keinen Einfluss auf das Höhenwachstum hat. Vielmehr beweist es, dass auf den Versuchsflächen vor dem Schirmverlust sehr ähnliche Überschirmungsbedingungen herrschten, sodass auch das Höhenwachstum der Buchen vergleichbar war. Da viele Buchenvoranbauten zum Zeitpunkt der Freistellung bereits zehn Jahre oder älter waren, reichten sechs Vegetationsperioden offenbar nicht aus, um mögliche Wachstumsunterschiede anhand der absoluten Buchenhöhen abzusichern.

Die vom Fichtenschirm ausgehende interspezifische Konkurrenz betrifft sowohl ober- als auch unterirdische Ressourcen (WAGNER 1999; AMMER 2000; PETRITAN ET AL. 2011). Als geeigneter Indikator hierfür hat sich die relative Strahlungsreduktion gegenüber der Verjüngung erwiesen (WAGNER ET AL. 2010). Diese ist von großer Bedeutung für das Höhenwachstum vorangebauter Buchen, wie die mehrfach nachgewiesene positive Beziehung von Strahlungsversorgung und Baumhöhe beweist (BURSCHEL ET AL. 1985; AMMER 1996; GRALLA ET AL. 1997; BEAUDET & MESSIER 1998; MESSIER & NIKINMAA 2000; COLLET ET AL. 2002; AMMER 2003; PETRITAN ET AL. 2007). Dabei folgt die lichtabhängige Höhenentwicklung der Buche einer Sättigungsfunktion, sodass nach Überschreiten eines Schwellenwerts der Strahlung kaum noch Zuwachssteigerungen eintreten (KUNSTLER ET AL. 2005; LÖF ET AL. 2007; LINNERT 2009). Dieser liegt nach STANCIOIU & O’HARA (2006b) bei ca. 25 % relativer Freilandstrahlung. Andere Autoren beobachteten erst ab 30–40 % einen Sättigungseffekt (COLLET & CHENOST 2006; PETRITAN ET AL. 2009). In Anlehnung an frühere Arbeiten im selben Untersuchungsgebiet (vgl. IRRGANG 1996; HERTRAMPF 2009) wurden die Versuchsflächen hinsichtlich der Überschirmung gezielt so ausgewählt, dass ein optimales

Verhältnis zwischen vitalem Wachstum und Qualität der Buchen zu erwarten war. Die relative Strahlungsverfügbarkeit (DIFFSF) unter solchen Fichtenschirmen beträgt bei Grundflächen von 25–35 m<sup>2</sup>/ha etwa 20–30 % des Freilands (GEROLD 1996; WAGNER & MÜLLER-USING 1997; HERTRAMPF 2009). Für 80- bis 120-jährige Fichtenreinbestände des Thüringer Waldes werden relative Beleuchtungsstärken von 25–35 % angegeben (MITSCHERLICH 1940). Die Höhentriebe der überschirmten Buchen bezeugen mit durchschnittlich 30–45 cm/a, dass unter diesen Bedingungen bereits eine ausreichende Strahlungsmenge für ein vitales Wachstum zur Verfügung steht, und unterstützen damit die Erkenntnisse vorausgegangener Arbeiten. Dennoch konnte als Folge der Freistellung ein weiterer Anstieg auf bis zu 55–60 cm/a geleistet werden. Triebblängen dieses Umfangs stellen im untersuchten Wuchsstadium das Maximum dar (PETRITAN ET AL. 2009). Die Buchen sind also auch bei bereits guten Ausgangsbedingungen in der Lage, die Strahlungserhöhung in eine weitere Zuwachssteigerung umzusetzen (MARTENS & PREIBLER 2010).

Interessant ist in diesem Kontext vor allem die Frage, mit welcher Reaktionszeit junge Buchen in der Lage sind, ihr Höhenwachstum nach einer Freistellung an die neuen Gegebenheiten anzupassen. Aus den Zuwachsverläufen geht hervor, dass in der direkt auf den Schirmverlust folgenden Vegetationsperiode 2007 noch keine Reaktion eintrat. Erst 2008 stellte sich bei den Triebblängen ein Aufwärtstrend ein. Im Einklang mit früheren Untersuchungen erfolgte die Reaktion des Höhenwachstums also um ein Jahr verzögert (COLLET ET AL. 2001; BEAUDET ET AL. 2007; JARCUSKA 2009; CAQUET ET AL. 2010). Aus Waldumbauversuchen in Sachsen geht hervor, dass die Zuwächse nach der Freistellung zunächst unverändert denen der Vorjahre folgten bzw. sogar zurückgingen. Erst nach einer zweijährigen Akklimatisierungsphase stiegen die Triebblängen deutlich an (MARTENS & PREIBLER 2010). Auch COLLET & CHENOST (2006) betonen, dass die Ausgangsüberschirmung bis zu zwei Jahre nach einer Freistellung auf den Höhenzuwachs der Buchen nachwirkt. Ursächlich für diese Erscheinung ist, dass das Längenwachstum in hohem Maß durch die mikroklimatischen Bedingungen des Vorjahres bestimmt wird (WELANDER & OTTOSSON 1997; AUSSENAC 2000; HERTRAMPF 2009), da hier bereits die Trieb- und Blattanlagen für das Folgejahr gebildet werden (ROLOFF 1986; ESCHRICH ET AL. 1989; AMMER 2003). Für den konkreten Untersuchungsgegenstand bedeutet dies, dass der Höhentrieb des Jahres 2007 beim Schirmverlust im Januar bereits vollständig in der Knospe determiniert war, und zwar gemäß den ökologischen Bedingungen des Vorjahressommers. Eine Reaktion auf die kürzlich eingetretene Freistellung war folglich nicht mehr möglich. Erst die im Jahresverlauf 2007

gebildeten Blattanlagen konnten gemäß den neuen Umweltbedingungen modifiziert werden, wodurch sich die verzögerte Reaktion des Haupttriebwachstums erklären lässt.

Gerade unter den Extrembedingungen einer abrupten Freistellung ist eine weitere Ursache des beobachteten Reaktionsmusters in einer Fotosynthesehemmung der Buchenblätter zu sehen. Diese kann sich bei schattenadaptierten Blättern infolge einer plötzlichen, den Lichtsättigungspunkt überschreitenden Strahlungserhöhung vorübergehend einstellen (ESCHRICH ET AL. 1989; TOGNETTI ET AL. 1998; VALLADERES ET AL. 2002). Auch klimatisch bedingte Schädigungen des Haupttriebmeristems sind nicht auszuschließen (ROLOFF 1986). Der Fotosyntheseapparat der Buche ist jedoch recht plastisch, wodurch bereits innerhalb des ersten Jahres nach einer Umweltänderung, spätestens aber mit Neubildung der Blätter im Folgejahr eine spürbare Anpassung an die veränderten Lichtbedingungen zu verzeichnen ist (TOGNETTI ET AL. 1994; ARANDA ET AL. 2001; ROBAKOWSKI & ANTCHAK 2008). Spätestens dann kann die verbesserte Ressourcenversorgung in eine entsprechende Wachstumsreaktion investiert werden.

Die Periode stetig ansteigender Höhenzuwächse dauerte drei Jahre an und erreichte 2010 ein Maximum. Dieses Reaktionsmuster steht im Einklang mit früheren Arbeiten (COLLET ET AL. 2001; BEAUDET ET AL. 2007). Allein BARNA ET AL. (2009) stellten bereits im zweiten Jahr nach der Kronendachöffnung signifikante Höhenunterschiede fest, welche innerhalb von acht Jahren noch deutlich ausgebaut wurden. Hinsichtlich der Intensität der Zuwachsreaktion wurde beobachtet, dass junge Buchen ihre Höhentriebe verdreifachen oder gar verfünffachen können (COLLET ET AL. 2001; BEAUDET ET AL. 2007), wobei die stärkste Zunahme zwischen der ersten und der zweiten Vegetationsperiode nach Freistellung eintrat (BEAUDET ET AL. 2007). Eine solch umfängliche Resonanz war bei den Buchen auf den KYRILL-Flächen nicht feststellbar. Trotz des konsequenten Aufwärtstrends in den Jahren 2008–2010 fällt die Zuwachserhöhung mit durchschnittlich 15–20 cm insgesamt relativ moderat aus. Bezogen auf die Phase vor der Freistellung entspricht dies einer Wachstumssteigerung um 40–70 %. Die Ursache dieser im Vergleich zu den Literaturangaben schwachen Reaktion ist in der Ausgangssituation vor der Freistellung zu sehen. Dadurch wird erneut bestätigt, dass unter locker-lichtem Fichtenschirm bereits eine gute Strahlungsversorgung gewährleistet ist, sodass die Buchen ein vitales Wachstum zeigen (HERTRAMPF 2009). Sie profitierten dadurch aber in geringerem Umfang von der zusätzlichen Ressourcenzufuhr, als dies bei einer dichten Ausgangsüberschirmung der Fall gewesen wäre (BRUNNER & HUSS 1994).



Wie lange sich das Wachstum auf diesem erhöhten Niveau halten wird, ist anhand der vorliegenden Daten nicht abschließend zu beantworten. Nach Überschreiten des Zuwachsmaximums im vierten Jahr des Freistands scheinen die Triebblängen tendenziell wieder rückläufig zu sein. Auch BEAUDET ET AL. (2007) machten eine vergleichbare Beobachtung. In diesem Zusammenhang ist die Gesetzmäßigkeit des altersabhängigen Wachstumsverlaufs zu berücksichtigen. Die untersuchten Buchen befinden sich hinsichtlich ihres jährlichen Höhenzuwachses bereits in der Hauptwachstumsphase, welche durch anfangs steigende Triebblängen charakterisiert ist. Auf mittleren Standorten tritt dann im Alter von 20–30 Jahren die Kulmination ein (BÜSGEN 1927; ERTELD & HENGST 1966; LEIBUNDGUT 1978). Für die Bewertung der vorliegenden Ergebnisse bedeutet dies einerseits, dass in den kommenden Jahren ein allmählicher Rückgang der Triebblängen zu erwarten ist. Andererseits ist die beobachtete Zuwachssteigerung vermutlich teilweise dem natürlichen Zuwachsverlauf und nicht allein der Freistellung geschuldet.

An frei stehenden, unbeschatteten Buchen spielt zudem die proleptische Triebbildung (Johannistriebe) eine wichtige Rolle. Diese tritt im Fall einer überdurchschnittlichen Ressourcenversorgung des Baums ein und kann durch einen zweiten Wachstumsschub im Sommer zu einer Verlängerung des Höhentriebs führen (BROWN 1952; ROLOFF 1986; MATYSSEK ET AL. 2010). Folglich kommen solche Erscheinungen auch als Erklärung größerer Triebblängen auf den KYRILL-Flächen infrage (SAGHEB-TALEBI 1996; PETRITAN ET AL. 2010), da im Zuge der Datenerhebung keine Trennung zwischen regulären Frühjahrstrieben und proleptischen Trieben vorgenommen wurde bzw. diese an älteren Trieben ohnehin kaum möglich ist (GRUBER 1997, 1998). Johannistriebe verholzen oft nur unvollständig und werden dadurch häufig durch Umwelteinflüsse (vor allem Frost) geschädigt. Dies begünstigt die Zwieselbildung und wirkt sich folglich negativ auf die Qualität der Buchen aus (BROWN 1952; LE TACON 1985; NICOLINI & CARAGLIO 1994; SCHMITT ET AL. 1995).

Auffällig ist der massive Einbruch der Triebblängen im Jahr 2011, welcher bei allen Varianten zu erkennen, bei freigestellten Buchen aber am stärksten ausgeprägt ist. Da der Zuwachsrückgang abrupt und in nur einem Jahr auftritt, sind klimatische Extreme als Ursache wahrscheinlich. Dabei ist zu beachten, dass die Trieblänge durch die Witterung der Monate Mai–August des Vorjahrs bestimmt wird (ROLOFF 1986). Vor allem im Juni 2010 lagen die Niederschläge im Untersuchungsgebiet bis zu 65 % unter dem langjährigen Mittel. Hinzu kamen um 2,5 °C höhere Temperaturen im Juli (DWD 2015). Diese trocken-warmen Bedingungen während der wichtigsten Phase der Knospenbildung spiegeln sich schließlich in

verminderten Triebblängen des Folgejahrs 2011 wider (ROLOFF 1986; LÖF & WELANDER 2000). Ähnliche Beobachtungen wurden nach dem Trockenjahr 2003 angestellt. Damals hielt die Wuchsdepression sogar mehrere Jahre an (EICHHORN ET AL. 2008). Hingegen bestätigt ROLOFF (2001) die vorliegenden Ergebnisse, denen zufolge sich die Zuwächse junger Buchen nach einem Trockenjahr in der darauffolgenden Vegetationszeit wieder erholen. Vor allem die Buchen auf Sturmflächen dürften 2010 unter erheblichem Trockenstress gelitten haben, sodass hier der stärkste Zuwachsrückgang zu verzeichnen war. Gegenüber den gemilderten Bedingungen unter Schirm sind Extreme der Luft- und Bodentemperatur sowie die Transpiration auf der Freifläche deutlich erhöht (CARLSON & GROOT 1997; VAN HEES 1997; AUSSÉNAC 2000). Infolgedessen verschärft sich auch die ohnehin schon angespannte Wasserversorgung, was zu massiven Zuwachseinbrüchen führt (VAN HEES 1997).

Die von der Pflanzendichte im Voranbau auf das Höhenwachstum der Buchen ausgehende Wirkung kann nur unter gleichzeitiger Berücksichtigung der Überschirmung richtig verstanden werden. So wurde gezeigt, dass hohe Bestandesdichten förderlich für das Höhenwachstum sind, was vor allem auf der Freifläche, weniger jedoch unter Schirm zum Ausdruck kommt. Die Pflanzenzahl pro Hektar fungiert dabei als Hinweis auf die Standraumverfügbarkeit der Buchen und ist Ausdruck der intraspezifischen Konkurrenz. Der Literatur sind diesbezüglich durchaus kontroverse Angaben zu entnehmen. Während viele Untersuchungen der innerartlichen Konkurrenz keinerlei Bedeutung für das Höhenwachstum beimessen (MUHLE & KAPPICH 1979; LANNER 1985; AMMER ET AL. 2005), berichten andere über eine negative Beziehung zwischen Pflanzendichte und Höhenzuwachs (BERGERS ET AL. 2006; HERTRAMPF 2009). Völlig konträr dazu schildern einige Arbeiten eine positive Korrelation von Bestandesdichte und Höhenwachstum, welche mit der konkurrenzbedingten Anregung des Höhenwachstums im Kampf um Strahlung erklärt wird (OTTO 1994; LEDER & WEIHS 2000; LINNERT 2009; BARBEITO ET AL. 2014). Die eigenen Ergebnisse bestätigen letzteren Ansatz, wobei eine Differenzierung hinsichtlich der Überschirmung wichtig erscheint. Dazu bemerken COLLET & CHENOST (2006), dass die Verjüngungsdichte unter Schirm keinen Effekt hat, während die Buchenhöhen nach der Freistellung bei mäßiger Konkurrenz am größten sind. Dies ist durch die herausragende Bedeutung der Baumhöhe im Wettbewerb um die überlebenswichtige Ressource Strahlung zu erklären (AMMER 2003; AMMER ET AL. 2005). Durch die steigende intraspezifische Konkurrenz werden die Buchen zur Erschließung neuen, bisher unbesetzten Wuchsraums gezwungen. Während das bei weitständigen Voranbauten durch horizontalen Kronenausbau erfolgt, schwindet diese Option

mit steigender Bestandesdichte, sodass die Buchen ein vermehrtes Höhenwachstum forcieren müssen (LEDER & WEIHS 2000; COLLET & CHENOST 2006). Wie die vorliegenden Ergebnisse zeigen, gelten diese Zusammenhänge hauptsächlich auf der Freifläche. Da dort kein Altholzschirm vorhanden ist, setzen die Buchen das unbegrenzte Ressourcenangebot direkt in eine Wachstumssteigerung um. Der Bestandesschluss tritt folglich früher ein und fällt intensiver aus als unter Schirm. Daraus resultiert eine umfängliche konkurrenzabhängige Differenzierung. Die wachstumsdämpfende Wirkung des Fichtenschirms schränkt diesen Prozess erheblich ein, sodass hier im Höhenwachstum kaum stammzahlabhängige Unterschiede auftreten. Dass die stammzahlarmen Buchenvoranbauten auf Sturmflächen oft geringere Höhen aufwiesen als solche unter Schirm, steht nicht im Widerspruch zu den geschilderten Zusammenhängen. Hier trat wegen der niedrigen Bestandesdichte bisher keine intensive Konkurrenz ein (LEDER & WEIHS 2000), sodass auch kein Anlass zum Ausbau des Höhenwachstums gegeben war. Ferner besteht unter diesen Bedingungen (Freifläche, kaum Bestandesschluss) auch ein besonders hohes Risiko für Frostschäden am Terminaltrieb, was ebenfalls als Ursache der geringeren Höhen im Vergleich zu ebenfalls stammzahlarmen Verjüngungen unter Schirm in Betracht kommt (PEIK 1976; CHAAR & COLIN 1999; NINGRE & COLIN 2007; FISICHELLI ET AL. 2014). Diese hier nicht explizit untersuchte Hypothese wird zumindest durch Beobachtungen auf den eigenen Versuchsflächen im Frühjahr 2012 gestützt (Abbildung 23).



**Abbildung 23:** Spätfroststeinwirkungen im Mai 2012 auf der Versuchsfläche Neuenbau 630a5-a8 im Thüringer Forstamt Sonneberg.

### 3.5.3 Durchmesserwachstum

Das Durchmesserwachstum der Buche weist im Vergleich zur Höhe eine deutlich stärkere Abhängigkeit von der Überschildung auf (BURSCHEL & SCHMALTZ 1965a; BRUNNER & HUSS

1994; PETERSEN & WAGNER 1999; AMMER 2000; COLLET & CHENOST 2006; COLLET ET AL. 2011). Die vorliegenden Ergebnisse bestätigen dies anhand der innerhalb von nur sechs Jahren höchst signifikant nachweisbaren Durchmesserdifferenzierung freigestellter und überschirmter Voranbauten von 2,69 cm. Es besteht also eine strenge negative Korrelation zwischen Überschirmungsintensität und Dickenwachstum der Buche (CAO 2001; COLLET ET AL. 2002; AMMER 2003; KÄTZEL ET AL. 2004). Nach Auflichtung des Oberstandes nehmen die Durchmesser zunächst linear zu, bis sich bei relativen Beleuchtungsstärken von etwa 35–40 % schließlich eine Sättigung einstellt (LEDER & WEIHS 2000; LINNERT 2009; PETRITAN ET AL. 2009). Wie diese Untersuchung belegt, werden die größten Dimensionen stets bei sehr guter Lichtversorgung bzw. auf der Freifläche erreicht (WAGNER & MÜLLER-USING 1997; AMMER 2003). Äußerst beeindruckend ist allerdings das Reaktionsausmaß nach der Freistellung. PETRITAN ET AL. (2009) ermittelten an Buchen ähnlichen Alters erst bei relativen Beleuchtungsstärken von 60 % mittlere Radialzuwächse von ca. 1,5 mm/a. In der vorliegenden Untersuchung leisteten die Bäume solche Zuwächse bereits unter locker-lichtem Fichtenschirm. Im Dickungsstadium wurden sogar noch höhere Werte gemessen, was ein erneuter Beleg für die dort herrschenden günstigen Entwicklungsbedingungen ist (HERTRAMPF 2009; WAGNER ET AL. 2010). Dennoch konnten die Jahrringbreiten nach dem Sturm nochmals um bis zu 250 % gesteigert werden. Zuwachserhöhungen dieses Umfangs sind bekannt, allerdings bei deutlich geringeren Ausgangswerten im Bereich der Strahlungsversorgung (CAO 2001; COLLET ET AL. 2001; BEAUDET ET AL. 2007). Junge Buchen können hinsichtlich ihres Durchmesserwachstums offenbar sehr dynamisch reagieren (CAO 2001; COLLET & CHENOST 2006). Erklärt wird dies mit der hohen morphologischen Plastizität der Buche, wodurch diese sich zügig an veränderte Umweltbedingungen anpassen und eine optimale Ressourcenausnutzung erreichen kann (BEAUDET & MESSIER 1998; ARANDA ET AL. 2001; VALLADERES ET AL. 2002; CURT ET AL. 2005; VALLADERES & NIINEMETS 2008; COLLET ET AL. 2011). Somit widersprechen die eigenen Erkenntnisse eindeutig früheren Arbeiten, denen zufolge Schattbaumarten wie die Buche nur in sehr beschränktem Umfang von einem Anstieg der Lichtversorgung profitieren können (CANHAM 1988, 1990).

Die höhere Plastizität des Dickenwachstums gegenüber dem Höhenwachstum wird auch durch die direkte Reaktion nach dem Schirmverlust verdeutlicht. So wurde wiederholt nachgewiesen, dass die Buche bereits im ersten Jahr der Freistellung mit einem Zuwachsanstieg reagiert (vgl. CANHAM 1990; COLLET ET AL. 2001; COLLET & CHENOST 2006; BEAUDET ET AL. 2007; CAQUET ET AL. 2010). Das Dickenwachstum eines Baums setzt erst sekundär, das heißt



mit zeitlicher Verzögerung auf das Höhenwachstum ein und ist nicht durch die vorjährige Knospe präterminiert. Infolgedessen wird es maßgeblich durch die Umweltbedingungen des aktuellen Jahres beeinflusst (LANNER 1985; COLLET ET AL. 2002; LÜTTGE ET AL. 2005). Es reagiert folglich sensibler auf ein verändertes Ressourcenangebot und kann dieses, wie im vorliegenden Fall, sofort in vermehrtes Wachstum umsetzen. Weniger eindeutig sind die Angaben darüber, wie lange sich diese Zuwachssteigerung fortsetzt. Einige Autoren beobachteten dies ausschließlich im ersten Jahr der Freistellung (CANHAM 1990; COLLET ET AL. 2001), andere über insgesamt drei Vegetationsperioden hinweg (BEAUDET ET AL. 2007). Bei den Buchen auf den KYRILL-Flächen wurde das Zuwachsmaximum sogar erst im vierten und fünften Jahr erreicht, bevor die Jahrringbreiten in den Jahren 2012 und 2013 wieder deutlich zurückgingen. Auch BEAUDET ET AL. (2007) machten vergleichbare Beobachtungen. Denkbare Ursachen könnten die Intensivierung der intraspezifischen Konkurrenz (COLLET & CHENOST 2006), aber auch klimatische Stressfaktoren sein (RAST & BRISBIN 1987; EICHHORN ET AL. 2008), wie sie bereits in Bezug auf das Höhenwachstum beschrieben wurden. Diesem Aspekt wurde allerdings nicht explizit nachgegangen. Im Hinblick auf das Produktionsziel Buchenqualitätsholz ist das durch die Freistellung hervorgerufene, unausgeglichene Jugendwachstum jedenfalls negativ zu beurteilen (MLINSEK & BAKKER 1990).

Der Jahrringbreitenverlauf des stärksten Grünasts der Buche folgt nach der Freistellung streng dem des Stammes. Obwohl die Reaktion des Astwachstums etwas weniger intensiv ausfällt, ergibt sich eine streng positive Korrelation zwischen Stamm- und Astzuwachs (MÄKINEN 1996; WAGNER & RÖKER 2000; LINNERT 2009; STORCH 2011; BARBEITO ET AL. 2014). Dadurch bilden freigestellte Buchen erheblich größere absolute Astdimensionen aus, als dies bei vergleichbaren Bedingungen unter Fichtenschirm der Fall ist (LE TACON 1985; LEDER & WEIHS 2000). Mit Blick auf die Qualität ist diese Entwicklung ausgesprochen negativ zu bewerten (RÖHRIG ET AL. 2006; KINT ET AL. 2010). Bezüglich der Beprobung des stärksten und somit vitalsten Grünasts weist MÄKINEN (2002) darauf hin, dass dessen Wachstum für andere Äste des Baums nicht repräsentativ ist. Dennoch wird diese Herangehensweise empfohlen, wenn Qualitätsaspekte von Interesse sind, da die maximale Astdimension ausschlaggebend für die Holzqualität ist.

In der Modellvorhersage waren bereits in den Jahren vor dem Sturm leicht ansteigende Jahrringbreiten an Stamm und stärkstem Grünast erkennbar, welche aus planmäßigen Nachlichtungen des Fichtenschirms und der anschließenden Reaktion der Buche resultierten. Diese Tendenzen treten darum bei freigestellten Voranbauten und unter Schirm

gleichermaßen auf. Ein künstlicher Modelleffekt infolge des gewählten Polynoms kann als Ursache ausgeschlossen werden. Würde der abgebildete Zuwachstrend nicht tatsächlich bestehen, hätte ein Polynom höheren Grades die Vorhersagekraft verbessern müssen. Gemessen am niedrigsten AIC war dies jedoch nicht der Fall.

Von der Pflanzendichte im Voranbau ging eine signifikante Wirkung auf den Wurzelhalsdurchmesser, nicht jedoch auf die Jahrringbreite an Stamm und Ästen aus. Steigende Bestandesdichten bewirken aufgrund der damit einhergehenden intraspezifischen Konkurrenzintensivierung bei Buchen eine signifikante Durchmesserabnahme (LANNER 1985; LEDER & WEIHS 2000; RUMPF & PETERSEN 2008; KINT ET AL. 2010). Wie gezeigt werden konnte, gilt dies unabhängig von der Überschirmung (COLLET & CHENOST 2006). Darüber hinaus existieren auch Untersuchungen, aus denen bezogen auf die Buche eine ebenso deutliche Beziehung zwischen jährlichem Radialzuwachs und Bestandesdichte hervorgeht (ROZAS & FERNÁNDEZ PRIETO 2000; COLLET & CHENOST 2006). Prinzipiell muss eine solche Beziehung auch in der vorliegenden Untersuchung bestehen, da die pflanzenzahlabhängige Differenzierung der Zustandsgröße Wurzelhalsdurchmesser nur so zu erklären ist. Eventuell ist der betrachtete Zeitraum zu kurz und wegen des zwischenzeitlichen Schirmverlusts zudem durch zu viele Störgrößen belastet. Die Jahrringbreiten streuen dadurch erheblich, sodass klare Trends hinsichtlich der Wirkung der Bestandesdichte im Modell nicht abgesichert werden können.

Die sowohl gegenüber intra- als auch interspezifischer Konkurrenz eindeutig nachgewiesene höhere Sensibilität des Durchmesserwachstums begründet sich im größeren Stellenwert der Baumhöhe im Wettbewerb um Ressourcen und somit im Daseinskampf innerhalb des gesamten Bestandes. Bei Ressourcenknappheit wird deshalb zunächst das Dickenwachstum zugunsten des Höhenwachstums reduziert (BURSCHEL & SCHMALTZ 1965a; AMMER 2003; AMMER ET AL. 2005). Verbessern sich die Umweltbedingungen, wirkt sich dies wiederum besonders vorteilhaft auf das Dickenwachstum aus (MITSCHERLICH 1970; COLLET ET AL. 2002; COLLET ET AL. 2011).

Der H/D-Wert ist ein Indikator für die konkurrenzabhängige Vitalität (WAGNER & RÖKER 2000; HAGEMANN 2005; LEONHARDT 2006) und mechanische Stabilität eines Baumes (KRAMER 1988; ROCK ET AL. 2004). Aus der zuvor erörterten unterschiedlichen Zuwachsreaktion von Höhe und Durchmesser resultieren die wesentlich niedrigeren H/D-Werte von freigestellten Buchen (WEIHS & KLAENE 2000; CAO 2001; LINNERT 2009;



PETRITAN ET AL. 2009). Außerdem legen die Bäume unabhängig von der Überschirmung bei hohen Pflanzendichten und demzufolge starker Seitendruckkonkurrenz ein schlankeres Wachstum an den Tag (PETERSEN & WAGNER 1999; HAGEMANN 2005; SCHULZ ET AL. 2005). Einen additiven Effekt von Schirm und Pflanzendichte schildert LEONHARDT (2006). Ihr zufolge treten die größten H/D-Werte unter Fichtenschirm bei zugleich starkem Seitendruck auf. Diese Zusammenhänge sind eindeutig, denn die Voranbauten auf Sturmflächen zeigen einen vitaleren Wuchs und besitzen aufgrund der demzufolge niedrigeren H/D-Werte eine höhere mechanische Widerstandsfähigkeit gegenüber durch Nassschnee verursachten Druck- und Bruchschäden als die deutlich schlankeren Bäume unter Fichtenschirm (KODRÍK 1988; OTTO 1994; PETRITAN ET AL. 2009).

#### **3.5.4 Effekt des Entwicklungsstadiums**

Das Entwicklungsstadium charakterisiert die natürliche Altersstufe der Buchenvoranbauten, die unabhängig vom tatsächlichen Baumalter ist. Wie sich in Bezug auf die untersuchten Voranbauten herausstellte, sind zustandsorientierte Altersstufen für waldbauliche Untersuchungen besser geeignet als das reale Alter, da Letzteres namentlich unter Schirm keine direkte Beziehung zu den Wachstumsgrößen der Bäume aufweist (COLLET ET AL. 2002; COLLET & CHENOST 2006).

Der mittlere Höhenunterschied zwischen den beiden Entwicklungsstadien betrug bezogen auf den Freistellungszeitpunkt etwa 2 m. Folglich stellt sich die Frage, inwiefern diese Höhendifferenz Einfluss auf Wachstum und Zuwachsreaktion der Buchen nach deren Freistellung hat. Die entsprechenden Forschungsergebnisse sind nicht eindeutig. Nach MESSIER & NIKINMAA (2000) ist das Höhenwachstum unabhängig von der Größe der Buchen. Andere Autoren stellten konträr dazu eine positive Korrelation zwischen Ausgangshöhe bzw. -durchmesser und Zuwachs unter Schirm fest (AMMER 1996; COLLET & CHENOST 2006; AMMER ET AL. 2008b). Die eigenen Ergebnisse lassen ebenfalls eine dimensionsabhängige Zuwachsdifferenzierung erkennen und bekräftigen damit den zuletzt beschriebenen Sachverhalt. So wiesen die Buchen im Dickungsstadium signifikant größere Triebhöhen auf als die vor Dickungsschluss. Auch für die Jahrringbreiten zeichnete sich diese Tendenz ab, konnte jedoch statistisch nicht gesichert werden.

Die Reaktion nach der Freistellung hingegen verlief in beiden Entwicklungsstadien sehr ähnlich. Bei keiner der analysierten Zustands- bzw. Zuwachsgrößen trat das Stadium in einer signifikanten Wechselwirkung mit einem anderen Faktor bzw. einer Kovariate im Modell auf.

Unter Beachtung der unterschiedlichen Ausgangswerte direkt vor KYRILL reagierten die Buchen beider Entwicklungsstadien also in gleicher Weise auf den Schirmverlust (COLLET ET AL. 2001; COLLET & CHENOST 2006). Dies ist insofern etwas verwunderlich, als die Voranbauten nach Dickungsschluss einer intensiveren intraspezifischen Konkurrenz ausgesetzt sein dürften als die vor Dickungsschluss. Die nahezu identischen H/D-Werte belegen jedoch, dass sich die konkurrenzabhängige Relation von Höhen- und Durchmesserwachstum in beiden Entwicklungsstadien nicht voneinander unterscheidet.

### **3.6 Waldbauliche Schlussfolgerung**

Die geschilderten Ergebnisse erlauben einige nützliche Rückschlüsse für den waldbaulichen Umgang mit Buchenvoranbauten. So konnte zunächst gezeigt werden, dass Buchen unter einem locker-lichten Fichtenschirm gute Wuchsbedingungen vorfinden. Diese moderate Überschirmung stellt einen geeigneten Kompromiss zwischen einem vitalen Wachstum und einer guten Qualitätsentwicklung der Buchen dar (HERTRAMPF 2009; PETRITAN ET AL. 2009).

Nach einer plötzlichen Freistellung reagieren sowohl Höhen- als auch Durchmesserwachstum auf die veränderten Umweltbedingungen, jedoch in unterschiedlicher Weise. Während das Höhenwachstum mit Verzögerung und nur gering zunimmt, reagiert das Durchmesserwachstum bereits im ersten Jahr des Freistands und zeigt insgesamt eine deutlich intensivere Zuwachserhöhung. Zur Quantifizierung des Reaktionsvermögens nach einer Umweltänderung ist eine Zeitreihenanalyse auf Basis des Durchmesserwachstums folglich die geeignete Methode (DITTMAR ET AL. 2003; CURT ET AL. 2005).

Innerhalb von sechs Jahren nach dem Schirmverlust fand eine deutliche Durchmesserdivergenzierung der freigestellten und der überschrömtten Voranbauten statt. Die Qualität der freigestellten Buchen wurde dadurch negativ beeinflusst, da Stamm- und Astwachstum eng miteinander korreliert sind. Für die waldbauliche Behandlung vorangebauter Fichtenbestände bedeutet dies, dass schnelle Räumungen unterbleiben müssen und der Überschrömungszeitraum gestreckt werden sollte. Durch eine schrittweise Nachlichtung des Schirms können sich die Buchen allmählich an die steigende Strahlungszufuhr anpassen. Zugleich kann der Zuwachs des Fichtenaltholzes genutzt werden (SPELLMANN & WAGNER 1993). Lange Überschrömungszeiträume ermöglichen zudem, dass die Voranbauten den Bestandesschluss erreichen, bevor sie verselbstständigt werden. Dadurch wird ein Bestandesinnenklima geschaffen, welches vor extremen abiotischen Einflüssen schützt (PALMER 1985).

Die Reaktionsmuster nach einem Schirmverlust sind bei Voranbauten vor und nach Dickungsschluss identisch. Der Bestandesschluss bewahrt offenbar nicht vor Qualitätsverlusten, denn in beiden Stadien war ein sehr ähnliches Zuwachsverhalten der stärksten Grünäste festzustellen. Ähnliches gilt für die Pflanzendichte im Voranbau. Trotz der zu erwartenden stärkeren intraspezifischen Konkurrenz im Dickungsstadium liegen keine Wachstumsunterschiede vor, was auch die in beiden Entwicklungsstadien nahezu identischen H/D-Werte belegen. Generell fördern hohe Pflanzenzahlen das Höhenwachstum, dämpfen jedoch gleichzeitig die Durchmesserzunahme, sodass die Buchen schlanker aufwachsen, was sich wiederum positiv auf die Qualität auswirkt (KINT ET AL. 2010).

### **3.7 Zusammenfassung**

In 29 mit Buche (*Fagus sylvatica* L.) vorangebauten Fichtenbeständen des Thüringer Waldes und des Erzgebirges wurde untersucht, wie sich der durch den Orkan KYRILL (Januar 2007) hervorgerufene sturmbedingte Schirmverlust auf das Wachstum der Buchen ausgewirkt hat. Dabei standen auch das Entwicklungsstadium sowie die Pflanzendichte des Voranbaus im Fokus. Sechs Jahre nach der Freistellung wurden Höhe sowie Wurzelhalsdurchmesser erhoben und die Haupttrieblängen der Jahre 2005–2012 retrospektiv gemessen. Über eine Jahrringanalyse wurden die Radialzuwächse im Zeitraum 2000–2013 an Stamm und stärkstem Grünast erfasst. Kernfrage der Untersuchung war die Zuwachsreaktion nach einer abrupten Freistellung der Buchen.

Sechs Jahre nach dem Sturmereignis ist kein signifikanter Höhenunterschied zwischen Buchen auf Sturmflächen und solchen unter Schirm zu konstatieren. Die Haupttrieblängen jedoch nahmen ab dem zweiten Jahr der Freistellung zu, sodass der Wachstumsgang der betreffenden Bäume signifikant von dem überschirmter Bäume abweicht. Eine Erhöhung der Pflanzenzahl pro Hektar fördert das Höhenwachstum. Das Durchmesserwachstum profitierte deutlich stärker von der Freistellung, das zeigten die signifikant größeren Wurzelhalsdurchmesser der freigestellten Buchen. Entsprechend intensiv fiel auch die Reaktion des Radialzuwachses aus, welche ohne Verzögerung im Jahr 2007 einsetzte. Der stärkste Grünast zeigte einen im Vergleich zum Stamm synchronen Wachstumsgang, allerdings auf niedrigerem Niveau. Auch der Zuwachsanstieg nach der Freistellung verlief moderater. Unabhängig von der Überschirmung dämpften hohe Bestandesdichten das Durchmesserwachstum; das bestätigten die Wurzelhalsdurchmesser, nicht jedoch die Jahrringbreiten in der untersuchten Periode 2000–2013. Gemessen am H/D-Verhältnis wiesen

Buchen unter Schirm sowie bei hoher Pflanzendichte einen schlankeren Wuchs auf. Zwischen den beiden Entwicklungsstadien, das heißt vor oder nach Dickungsschluss, bestand kein Unterschied.

Aus den Ergebnissen wird die Schlussfolgerung gezogen, dass die Buchen unter lockerlichem Fichtenschirm ein vitales Höhenwachstum sowie eine schlanke und damit qualitativ erwünschte Wuchsform aufweisen. Eine plötzliche Freistellung von an den Halbschatten adaptierten Buchen trägt aufgrund des gesteigerten Ressourcenangebots vor allem zur Forcierung des Dickenwachstums bei. Mit Blick auf die Qualität der Buchen ist vor allem die umfängliche Zuwachsreaktion der Äste kritisch zu betrachten. Für die waldbauliche Behandlung von Buchenvoranbauten unter Fichtenschirm bedeutet dies, dass eine abrupte Räumung unterbleiben muss und der Übershirmungszeitraum zu strecken ist. Durch eine schrittweise Nachlichtung können die Buchen allmählich an die Freistellung akklimatisiert werden.

## **4 Astigkeit und Astreinigung vorangebauter Buchen nach sturmbedingtem Schirmverlust**

### **4.1 Hintergrund und Ziele der Untersuchung**

Der Waldumbau von Fichtenreinbeständen mittels Buchenvoranbau stellt einen probaten Weg zur Sicherung der vielfältigen Waldfunktionen sowie einer Verringerung bzw. Verteilung des Produktionsrisikos vor dem Hintergrund unsicherer Umweltbedingungen dar (BRADSHAW 2005; HANSEN & SPIECKER 2005; KNOKE ET AL. 2008; WAGNER 2008; ROESSIGER ET AL. 2013). Gleichzeitig scheint die kostenintensive Veränderung der Baumartenzusammensetzung zulasten der bisherigen Hauptwirtschaftsbaumart Fichte für viele Forstbetriebe nur unter der Voraussetzung eine sinnvolle Alternative zu sein, dass die Buche hohe Holzqualitäten und entsprechende Erlöse erwarten lässt (WAGNER 2007). Die waldbauliche Behandlung von Buchenvoranbauten ist demzufolge konsequent auf das Produktionsziel Wertholz ausgerichtet (LEDER & HILLEBRAND 2001; SPELLMANN 2005; ECKARDT & ARENHÖVEL 2006; NAGEL & SPELLMANN 2008; SACHSENFORST 2013c).

Ein wichtiger Indikator für die Qualitätserwartung junger Laubhölzer ist deren Astigkeit (LEDER & HILLEBRAND 2001; MÄKINEN 2002; BÖRNER ET AL. 2003). So versprechen Buchen mit einer geringen Anzahl schwach dimensionierter und möglichst horizontal ansetzender Äste ein hohes Qualitätspotenzial (FABRICIUS 1929; KURTH 1946; FREIST 1980; RUMPF & PETERSEN 2008; KINT ET AL. 2010; HAGEMANN ET AL. 2013). In den vergangenen zwei Jahrzehnten wurden zahlreiche Untersuchungen zur Qualitätsentwicklung von Buchenvoranbauten unter Fichtenschirm und deren Beeinflussbarkeit durch waldbauliche Maßnahmen durchgeführt. Diese kamen weitgehend zu dem übereinstimmenden Ergebnis, dass die Pflanzenzahl als Maß der intraspezifischen Konkurrenz (KLEIN 1983; LEDER & WEIHS 2000), die Intensität der Altholzüberschirmung (GRALLA ET AL. 1997; LINNERT 2009) sowie die Interaktion dieser beiden Faktoren die wesentlichen Einflussgrößen darstellen (LEONHARDT & WAGNER 2006; RUMPF & PETERSEN 2008; WAGNER ET AL. 2010).

Für die waldbauliche Behandlung vorangebauter Bestände bedeuten diese Erkenntnisse vor allem, dass der Fichtenschirm auch nach der Etablierung der Buchen noch eine geraume Zeit lang unentbehrlich ist, weil er eine pflegende Funktion erfüllt. In Anbetracht der oft erheblichen Prädisposition umbaudringlicher Fichtenbestände gegenüber biotischen wie auch abiotischen Schadfaktoren (BRÄUNIG & DIETER 1999; DOBBERTIN ET AL. 2002; SCHMIDT ET

AL. 2010), welche durch die im Zuge des Voranbaus erforderlichen Nutzungseingriffe zusätzlich steigt (HANSEN & SPIECKER 2005; ALBRECHT 2009; GRIESS ET AL. 2012), stellt sich jedoch die Frage nach den Folgen eines unplanmäßigen, plötzlichen Schirmverlusts für die Qualitätsentwicklung davon betroffener junger Buchen. Erste Anhaltspunkte hierzu liefern die Arbeiten von LE TACON (1985) sowie OTT ET AL. (2003), welche Freiflächenpflanzungen von Buche untersuchten und vornehmlich schlechte Qualitäten vorfanden. Allerdings wurde bisher nicht explizit über die Astigkeit unter Fichtenschirm etablierter und erst nach mehrjähriger Standzeit abrupt freigestellter Buchenvoranbauten im Jungwuchs- und Dickungsstadium berichtet. Von waldbaupraktischer Relevanz ist in diesem Zusammenhang weiterhin, inwiefern drohenden Qualitätsverlusten durch entsprechend hohe Pflanzendichten (intraspezifische Konkurrenz) vorgebeugt werden kann. Diesbezüglich weisen LEONHARDT & WAGNER (2006) darauf hin, dass Schirm- und Seitendruck bei gleicher Qualitätserwartung variabel kombiniert werden können, wenn die Pflanzendichte im Voranbau 5.000 St./ha nicht unterschreitet. Allerdings geht auch diese Untersuchung von einer langfristigen Kontinuität der Überschirmung aus, sodass der Aspekt einer plötzlichen Freistellung unberücksichtigt bleibt.

An dieser Stelle setzt die vorliegende Forschungsarbeit an, indem sie die Qualitätserwartung von Buchenvoranbauten vor dem Hintergrund eines erhöhten Sturmwurfrisikos der Fichtenschirme betrachtet. Hierfür wurden Voranbauten, die im Januar 2007 durch den Orkan KYRILL freigestellt wurden, sechs Jahre nach dem Schirmverlust hinsichtlich Astigkeit und Astreinigung analysiert. Folgende Fragestellungen standen dabei im Vordergrund:

- Welche Auswirkungen hat ein plötzlicher Verlust des Fichtenschirms auf die qualitätsrelevanten Astmerkmale sowie die Astreinigung vorangebauter Buchen?
- Können die Folgen eines plötzlichen Schirmverlusts durch hohe Pflanzendichten im Voranbau (zumindest teilweise) kompensiert werden?
- Welche Bedeutung kommt dem Entwicklungsstadium der Voranbauten zum Freistellungszeitpunkt (Dickungsschluss) hinsichtlich der weiteren Qualitätsentwicklung zu?

Die Forschungsergebnisse sollen zunächst das Qualitätspotenzial freigestellter Buchenvoranbauten unterschiedlicher Pflanzendichten und Entwicklungsstadien aufzeigen. Auf Basis dieser Erkenntnisse werden risikodifferenzierte Empfehlungen für den Waldumbau mittels Buchenvoranbau hergeleitet.



## 4.2 Material und Methoden

In den Buchenvoranbauten wurden verschiedene qualitätsbezogene Astparameter am Einzelbaum erhoben. Deren Auswahl und methodische Erfassung orientierten sich an einem von der Sektion Waldbau im DEUTSCHEN VERBAND FORSTLICHER FORSCHUNGSANSTALTEN herausgegebenen Aufnahmeverfahren (vgl. BÖRNER ET AL. 2003). Hierbei wurden die Bäume in 1,5-m-Segmente unterteilt, in welchen die Parameter jeweils separat zu erfassen waren (Abbildung 24). Daraus konnten anschließend auf den Einzelbaum bezogene Größen errechnet werden. In der vorliegenden Arbeit wurde die intensive Stufe der Aufnahmeanweisung durchgeführt. Dabei wurden ausschließlich Primäräste berücksichtigt (Tabelle 14).

**Tabelle 14:** Übersicht über die erhobenen qualitätsbezogenen Astparameter, deren Definition und Erhebungsmethoden. In Anlehnung an BÖRNER ET AL. (2003).

Qualitätsparameter am Einzelbaum	Einheit	Definition/Methode der Erhebung
Anzahl Grünäste erster Ordnung	[n]	Summe der segmentweisen Zählung
Durchmesser stärkster Grünast	[cm]	3 cm über der Ansatzstelle, <u>Messung:</u> Kreuzklappung mit digitalem Messschieber
Astwinkel	[Grad]	Arithmetisches Mittel der Astwinkel des jeweils stärksten primären Grünasts jedes 1,5-m-Schaftsegments, <u>Messung:</u> Winkel zwischen Stamm- und Astachse von oben, Winkelmesser mit 5°-Einteilung (Abbildung 24)
Anzahl Totäste	[n]	Summe der segmentweisen Zählung; nur abgestorbene, nicht überwallte Äste
Durchmesser stärkster Totast	[cm]	3 cm über dem Astansatz, <u>Messung:</u> Kreuzklappung mit digitalem Messschieber
Grünastfreie Schaftlänge (Astreinigung)	[cm]	Schaftabschnitt zwischen Boden und erstem primärem Grünast, Totäste können in diesem Bereich vorkommen, <u>Messung:</u> Teleskopmesslatte

Darüber hinaus wurden auf Basis dieser gemessenen Parameter weitere Variablen berechnet. Hierbei handelt es sich um relative Maßzahlen, welche den Vergleich unterschiedlich dimensionierter Bäume erlauben. Die Grünastdichte gibt die Astanzahl pro Längeneinheit wieder [n/m] (MOURELLE ET AL. 2001). Sie wurde in dieser Arbeit als Quotient aus der Gesamtzahl der primären Grünäste einer Buche sowie deren Kronenlänge berechnet und beschreibt folglich, wie viele Grünäste erster Ordnung pro Meter Kronenlänge durchschnittlich ansetzen (Formel 12).

$$\text{Grünastdichte} = \frac{\text{Grünastanzahl pro Baum [n]}}{(\text{Baumhöhe} - \text{grünastfreie Schaftlänge}) [\text{m}]} \quad (12)$$

Der Aststärkenindex ASIX von STRUCK & DOHRENBUSCH (2000) setzt den Durchmesser des stärksten Grünasts eines Baums in Relation zum Stammdurchmesser. In dieser Arbeit wurde

der Wurzelhalsdurchmesser (10 cm über dem Boden) als Bezugsbasis verwendet (Formel 13), was dem Entwicklungsstadium der Voranbauten geschuldet ist. Einige Buchen wiesen Höhen von unter 2 m auf, sodass eine Messung des Brusthöhendurchmessers nicht sinnvoll erschien.

$$ASIX = \frac{\text{Durchmesser stärkster Grünast [cm]}}{\text{Wurzelhalsdurchmesser [cm]}} \times 100 \quad (13)$$

Die Grundidee dieser relativen Astigkeit ist, dass Äste mit identischem Durchmesser bei geringer dimensionierten und somit weniger wüchsigen Bäumen zu stärkeren Qualitätsbeeinträchtigungen führen, als dies bei höherem Stammdurchmesser der Fall ist. Je höher der ASIX, desto geringer die Qualität eines Baums (STRUCK & DOHRENBUSCH 2000).



**Abbildung 24:** Unter Verwendung einer Messlatte mit Millimetereinteilung wurden die Buchen in 1,5-m-Segmente eingeteilt und die Grenzen mit Wachskreide markiert (links). Die Messlatte diente auch zur Erhebung der jeweiligen Astansatzhöhen. Die Messung des Astwinkels erfolgte mit einer Messlehre (5°-Einteilung, rechts).

### 4.3 Statistische Auswertung

Um den Effekt der sturmbedingten Freistellung, der Pflanzenzahl im Voranbau sowie des Entwicklungsstadiums auf die qualitätsrelevanten Astmerkmale der Buchen zu analysieren, wurden lineare gemischte Modelle (LMM) nach der in Kapitel 2.4.2 (S. 40) erläuterten Prozedur angewendet (vgl. PINHEIRO & BATES 2000; HAMM ET AL. 2014). Daraus resultiert folgende allgemeine Modellgleichung (14):

$$Y_{ijklmno} = (\beta_0) \text{ Intercept} + (\beta_{1,i}) \text{ Schirm} + (\beta_2) \text{ Pflanzenzahl} + (\beta_{3,j}) \text{ Stadium} + (b_{4,k}) \text{ Region} + (b_{5,l}) \text{ Forstbetrieb} + (b_{6,m}) \text{ Revier} + (b_{7,n}) \text{ Fläche} + \varepsilon_{ijklmno} \quad (14)$$

Die Response-Variable  $Y$  steht für die jeweiligen Astmerkmale, welche durch eine lineare Beziehung aus  $(\beta_0)$  Intercept, den Faktoren  $(\beta_{1,i})$  Schirm (zwei Stufen: Freistellung vs. unter Schirm) und  $(\beta_{3,j})$  Entwicklungsstadium (zwei Stufen: vor vs. nach Dickungsschluss) sowie

der ( $\beta_2$ ) Pflanzenzahl als Kovariate beschrieben werden („fixed effects“). Weiterhin wird die hierarchisch geschachtelte Versuchsanlage im Zufallsterm ( $b_{4,k} - b_{7,n}$ ) berücksichtigt („random effects“). Das  $\varepsilon$  beinhaltet die Reststreuung. Die Indizes stehen für die verschiedenen Faktorstufen der festen ( $i - j$ ) bzw. zufälligen Effekte ( $k - n$ ) sowie die Einzelwerte auf Plotebene ( $o$ ). Traten zusätzlich zu den in Formel (14) dargestellten Einzeleffekten auch Wechselwirkungen zwischen den erklärenden Variablen auf, so wurden diese in der Modellkonstruktion ebenfalls bedacht. Bei einigen Astparametern wurden erhebliche Abweichungen der Modellresiduen von der Normalverteilung festgestellt. Dies konnte mittels Logarithmustransformation bzw., falls diese nicht zum Erfolg führte, der Box-Cox-Transformation behoben werden (HEDDERICH & SACHS 2012). Die Modellschätzungen lagen dann ebenfalls in transformierter Form vor und wurden zur Vermeidung von Interpretationsproblemen entsprechend gekennzeichnet („ln-transformiert“ bzw. „Box-Cox-transformiert“).

Für die Modellierung der Totastanzahl (ganzzahlige Zähldaten) wurde ein generalisiertes lineares gemischtes Modell (GLMM) unter Annahme einer Poisson-Verteilung angewendet (Kapitel 2.4.4, S. 47). In der hier eingesetzten Form glmmPQL berücksichtigt es explizit die im vorliegenden Fall nachgewiesene Overdispersion (ZUUR ET AL. 2009). Das Modell wird durch folgende Formel (15) abgebildet:

$$\ln(Totastzahl_{ijklm}) = (\beta_0) Intercept + (\beta_{1,i}) Schirm + (\beta_2) \ln(Pflanzenzahl) + (\beta_{3,j}) Stadium + (b_{4,k}) Revier + (b_{5,l}) Fläche + \varepsilon_{ijklm} \quad (15)$$

Alternativ wäre für den ASIX [%] als relatives Astigkeitsmaß ein auf der Annahme einer Binomialverteilung (Proportionaldaten) basierendes GLMM denkbar gewesen (vgl. ZUUR ET AL. 2009). Dieses wurde auch geprüft, dann aber verworfen, da die beobachtete Verteilung erheblich von der zugrunde gelegten Idealverteilung abwich. Darüber hinaus konnte die beträchtliche Heteroskedastizität nicht korrigiert werden. Infolgedessen wurde hier als bessere Option auf ein LMM zurückgegriffen. Die dadurch erzielte Verteilung der Modellresiduen bestätigte den Vorteil des angewendeten Verfahrens gegenüber dem glmmPQL.

## 4.4 Ergebnisse

### 4.4.1 Qualitätskriterium Grünäste

Die *Dichte primärer Grünäste* in der Krone sturmbedingt freigestellter Buchen unterscheidet sich signifikant von Voranbauten unter Fichtenschirm. Wie das statistische Modell beweist,

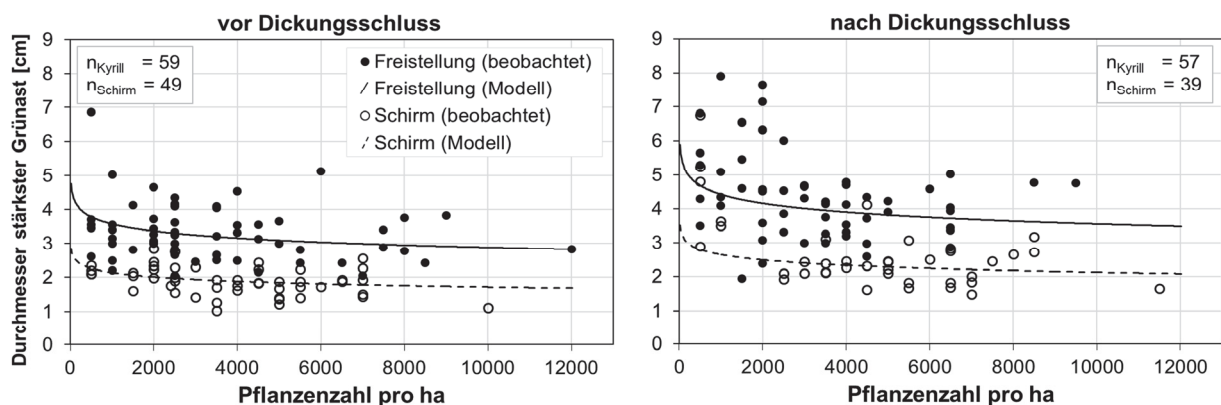
spielen hierbei verschiedene Faktoren sowie deren wechselseitige Interaktion eine ausschlaggebende Rolle (Tabelle 15). Bei niedrigen Pflanzenzahlen bilden die freigestellten Bäume höhere Astdichten aus als die unter Schirm. Steigt die Stammzahldichte in der Verjüngung, geht die Astdichte hingegen kontinuierlich zurück ( $\beta_2 = -0,00037$ ). Wirklich umfänglich tritt dieser Effekt aber nur unter Freiflächenbedingungen auf, wie aus der signifikanten Wechselwirkung von Schirm und Pflanzenzahl pro Hektar hervorgeht [ $(\beta_2) - (\beta_1 \times \beta_2) = -0,00013$ ]. Folglich bilden die Buchen im Stadium vor Dickungsschluss sowohl auf der Freifläche als auch unter Schirm bei mittleren Pflanzenzahlen von 6.000 St./ha neun Grünäste pro Meter Kronenlänge aus. Oberhalb der genannten Stammzahldichte kehrt sich das Verhältnis dann um, sodass freigestellte Buchen geringere Astdichten aufweisen. Diese Zusammenhänge gelten für beide Entwicklungsstadien gleichermaßen, wobei die Werte im Dickungsschluss generell um 2,5 Äste pro Meter Kronenlänge niedriger sind.

**Tabelle 15:** Ergebnisse der linearen gemischten Modelle (LMM) zur Schätzung der qualitätsbezogenen Grünastparameter in Abhängigkeit von Schirm, Pflanzenzahl und Entwicklungsstadium des Voranbaus. Das Intercept bezieht sich auf freigestellte Voranbauten vor Dickungsschluss.

feste Effekte		Modell-schätzung	Standard-fehler	p-Wert
Grünastdichte [n pro 1 m Kronenlänge]				
$\beta_0$	Intercept	11,26990	1,0481	<b>0,0000***</b>
$\beta_1$	Schirm	-1,45144	0,6646	<b>0,0303*</b>
$\beta_2$	Pflanzenzahl pro Hektar	-0,00037	0,0001	<b>0,0000***</b>
$\beta_3$	Entwicklungsstadium	-2,54343	0,4628	<b>0,0000***</b>
$\beta_1 \times \beta_2$	Schirm $\times$ Pflanzenzahl pro Hektar	0,00024	0,0001	<b>0,0329*</b>
Durchmesser stärkster Grünast [cm]				
ln-transformiert				
$\beta_0$	Intercept	1,90094	0,2094	<b>0,0000***</b>
$\beta_1$	Schirm	-0,51695	0,0423	<b>0,0000***</b>
$\beta_2$	ln (Pflanzenzahl pro Hektar)	-0,09083	0,0250	<b>0,0004***</b>
$\beta_3$	Entwicklungsstadium	0,21366	0,0539	<b>0,0001***</b>
ASIX [%]				
$\beta_0$	Intercept	49,45931	2,6774	<b>0,0000***</b>
$\beta_1$	Schirm	-8,77420	1,8470	<b>0,0000***</b>
$\beta_2$	Pflanzenzahl pro Hektar	-0,00114	0,0003	<b>0,0000***</b>
$\beta_3$	Entwicklungsstadium	-3,59936	-3,1388	<b>0,0020**</b>
$\beta_1 \times \beta_2$	Schirm $\times$ Pflanzenzahl pro Hektar	0,00104	0,0004	<b>0,0048**</b>
Astwinkel [°]				
$\beta_0$	Intercept	49,09738	2,7970	<b>0,0000***</b>
$\beta_1$	Schirm	9,87609	1,8908	<b>0,0000***</b>
$\beta_2$	Pflanzenzahl pro Hektar	0,00011	0,0004	0,7500
$\beta_3$	Entwicklungsstadium	-3,64727	2,8552	0,2256

Der *Durchmesser des stärksten Grünasts* vollzieht nach dem Schirmverlust eine äußerst drastische Reaktion (Abbildung 25). Ungeachtet aller weiteren Bestandesbedingungen stiegen

die Werte innerhalb der sechs Vegetationsperioden höchst signifikant an und liegen dadurch im Mittel 1,0–1,6 cm höher als unter Fichtenschirm. Bei durchschnittlichen Pflanzenzahlen im Voranbau von 6.000 St./ha betragen die maximalen Astdimensionen im Stadium vor Dickungsschluss etwa 1,8 cm unter Schirm sowie 3,0 cm auf KYRILL-Flächen. Nach Dickungsschluss werden 2,2 cm bzw. 3,8 cm erreicht. Von allen untersuchten Einflussfaktoren kommt dem Schirmverlust somit die weitaus größte Bedeutung zu (Tabelle 15). Eine Erhöhung der Pflanzenzahl pro Hektar bewirkt, dass die Astdimensionen höchst signifikant sinken. Dieser Prozess erfolgt unabhängig von der Überschirmung, wie der annähernd parallele Verlauf beider Modellfunktionen belegt. Die Beziehung von Astdurchmesser und Pflanzenzahl pro Hektar wird durch eine logarithmisch fallende Funktion erklärt. Demnach treten bei weitständigen Voranbauten äußerst hohe Astdimensionen auf, welche mit zunehmender Bestandesdichte sehr bald deutlich zurückgehen. Besonders deutlich ist dies im Stadium nach Dickungsschluss bei Stammzahlen bis etwa 2.500 St./ha zu beobachten (Abbildung 25). Steigen die Bestandesdichten weiter, lässt ihr Effekt auf den Astdurchmesser stetig nach. Die Wirkungen von Schirmverlust und Pflanzenzahl pro Hektar treffen auf beide Entwicklungsstadien gleichermaßen zu, wobei die absoluten Werte bei Voranbauten nach Dickungsschluss höchst signifikant größer sind. Auch die Durchmesserdivergenz infolge der Freistellung erfolgt etwas umfänglicher.

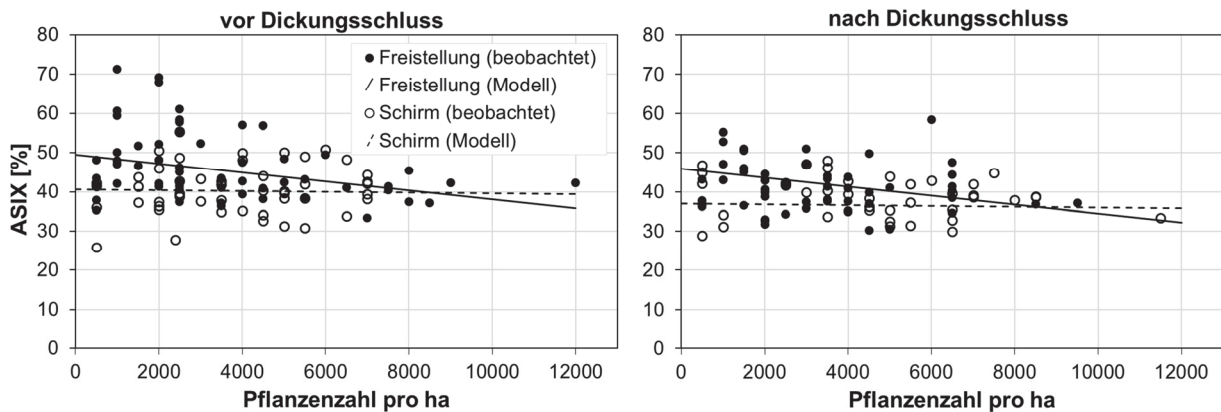


**Abbildung 25:** Durchmesser des stärksten Grünasts der Buchen im Jahr 2012 in Abhängigkeit von der Pflanzenzahl pro Hektar, getrennt nach Entwicklungsstadium und Überschirmung.

Bei relativer Betrachtung des maximalen Grünastdurchmessers *ASIX* ergibt sich ein gänzlich anderes, weitaus weniger differenziertes Bild als bei den absoluten Durchmesserwerten (Abbildung 26). Zwar sind die freigestellten Buchen auch dann höchst signifikant starkastiger, jedoch nur bei Pflanzenzahlen von bis zu 8.500 St./ha. Hier beträgt der *ASIX* in beiden Überschirmungsvarianten 39,8 % vor bzw. 36,2 % nach Dickungsschluss. Bei noch höheren Bestandesdichten sind freigestellte Voranbauten relativ gesehen sogar feinastiger als jene



unter Fichtenschirm. Ursächlich dafür ist die höchst signifikante Wechselwirkung von Schirm und Pflanzenzahl pro Hektar (Tabelle 15), sodass eine merkliche Verminderung der relativen Astigkeit nur auf der Freifläche eintritt ( $\beta_2 = -0,00114$ ), während der ASIX unter Schirm kaum von der Stammzahldichte abhängig zu sein scheint [ $(\beta_2) - (\beta_1 \times \beta_2) = -0,00010$ ]. Unter identischen Bestandesbedingungen sind die Werte der Voranbauten im Dickungsschluss um 3,6 Prozentpunkte niedriger als bei Jungwüchsen ohne Dickungsschluss. Auch dieser Effekt ist hoch signifikant



**Abbildung 26:** Der relative Astdurchmesser ASIX in Abhängigkeit von der Pflanzenzahl pro Hektar, getrennt nach Entwicklungsstadium und Überschirmung. Der ASIX gibt die Relation von Astdurchmesser und Wurzelhalsdurchmesser des Baumes an.

Auf den Sturmflächen besitzen die Buchen durchschnittliche *Astwinkel* von  $49^\circ$ . Im Vergleich zu Voranbauten unter Fichtenschirm setzen die Äste damit um  $10^\circ$  steiler an. Das statistische Modell dokumentiert, dass der Schirmverlust zugleich der einzige Faktor ist, von dem in dieser Untersuchung ein signifikanter Effekt auf den Astwinkel ausgeht (Tabelle 15). Weder Pflanzendichte noch Entwicklungsstadium des Voranbaus modifizieren dessen Ausprägung.

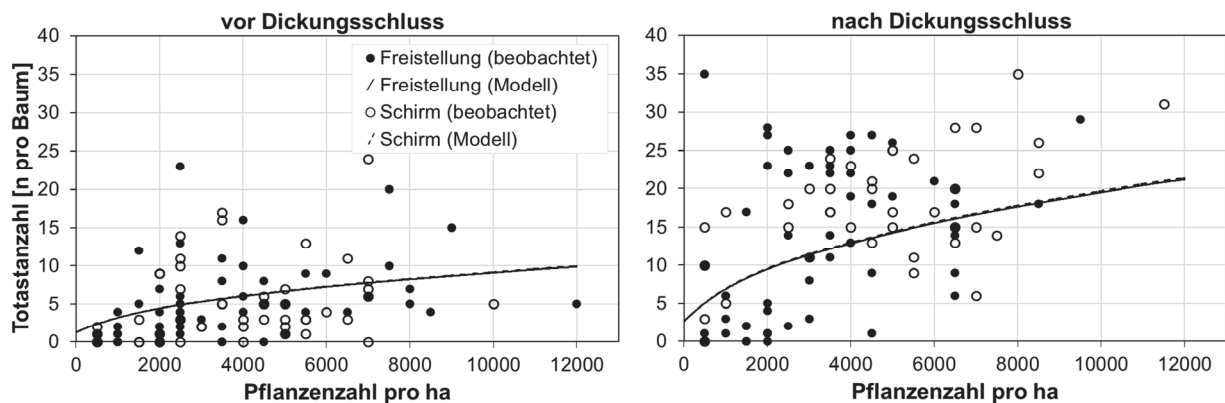
#### 4.4.2 Qualitätskriterium Astreinigung

Neben den Charakteristika lebender Äste hängt die Qualität von Buchen maßgeblich vom Fortschritt des Absterbe- und Überwallungsprozesses ab. Auf diesen Aspekt wird im Folgenden anhand verschiedener Parameter eingegangen.

Die *Anzahl primärer Totäste* zeigt keine Abhängigkeit von der Überschirmung. Treibende Kraft des Absterbeprozesses ist offenbar die Pflanzenzahl im Voranbau (Abbildung 27). Je höher diese ist, desto mehr Totäste kommen an einem Baum vor. Dieser Zusammenhang ist höchst signifikant und wird im generalisierten Modell durch eine Logarithmusfunktion beschrieben (Tabelle 16). Gleichwohl bestehen hier Unterschiede zwischen den Entwicklungsstadien, welche ebenfalls höchst signifikant sind. So verläuft der Anstieg der



Totastzahlen infolge der zunehmenden Bestandesdichten bei Voranbauten nach Dickungsschluss wesentlich intensiver. Bei Pflanzendichten von 6.000 St./ha treten sieben bzw. 16 Totäste pro Baum auf. Die Differenzierung zwischen den Entwicklungsstadien nimmt mit zunehmender Bestandesdichte weiter zu, sodass bei 12.000 St./ha bereits zehn bzw. 21 Totäste pro Baum vorkommen. Buchenvoranbauten nach Dickungsschluss weisen also stets größere Totastzahlen auf.



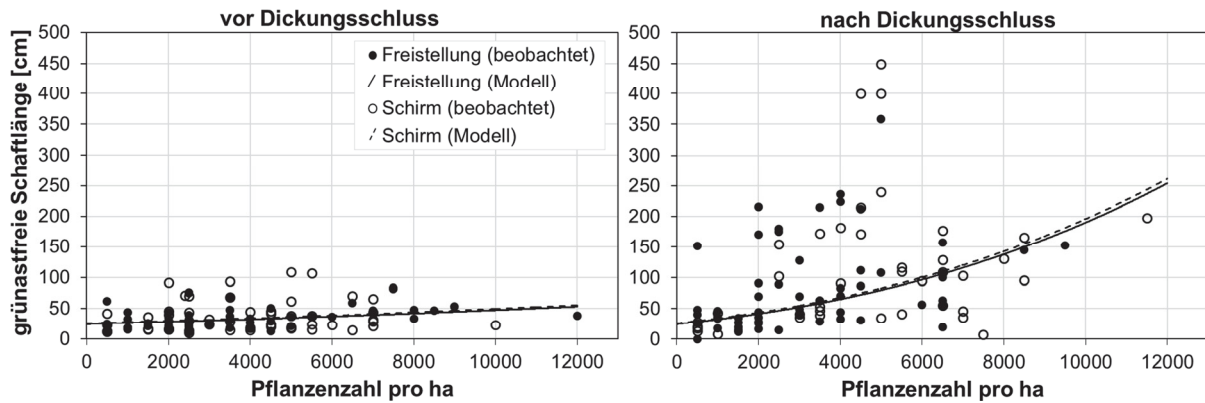
**Abbildung 27:** Die Anzahl primärer Totäste je Buche, dargestellt über die Pflanzenzahl pro Hektar, getrennt nach Entwicklungsstadium und Überschirmung.

Von allen untersuchten Totastparametern zeigt der *Durchmesser des stärksten Totasts* als einziger eine klare Abhängigkeit von der Überschirmung. An freigestellten Voranbauten kommen ausnahmslos in höchst signifikantem Ausmaß größere Totastdurchmesser vor (Tabelle 16). Zudem steigen die Dimensionen mit zunehmender Bestandesdichte linear an, und zwar unabhängig von der Überschirmung. Bei Pflanzenzahlen von 6.000 St./ha werden im Stadium vor Dickungsschluss Totastdurchmesser von 0,96 cm auf Sturmflächen sowie von 0,74 cm unter Fichtenschirm erzielt. Bei Voranbauten nach Dickungsschluss sind die absoluten Werte erheblich größer, zudem ist die Differenzierung zwischen den Überschirmungsvarianten stärker ausgeprägt. Die Totastdurchmesser betragen hier 1,44 cm bzw. 1,08 cm. Auch die Effekte von Pflanzenzahl pro Hektar und Entwicklungsstadium konnten im gemischten Modell hoch bzw. höchst signifikant abgesichert werden (Tabelle 16). Absolut gesehen findet aber trotz der durchweg signifikanten Zusammenhänge nur eine sehr eingeschränkte Differenzierung der Totastdurchmesser statt. Das geht einerseits aus den oben genannten Werten hervor, andererseits wird es dadurch bekräftigt, dass die maximalen Totastdurchmesser auf der Freifläche infolge einer weiteren Steigerung der Bestandesdichte von 6.000 St./ha gerade einmal um 0,21 cm vor bzw. 0,37 cm nach Dickungsschluss ansteigen.

**Tabelle 16** Ergebnisse der gemischten Modelle zur Schätzung der Totastparameter und der Astreinigung der Buchen in Abhängigkeit von Schirm, Pflanzenzahl und Entwicklungsstadium des Voranbaus. Der jeweils angewendete Modelltyp (LMM, GLMM) ist ausgewiesen. Das Intercept bezieht sich auf freigestellte Voranbauten vor Dickungsschluss.

feste Effekte		Modell-schätzung	Standard-fehler	p-Wert
glmmPQL: Totastzahl [n pro Baum]		ln-transformiert		
$\beta_0$	Intercept	-1,94631	0,6747	<b>0,0044**</b>
$\beta_1$	Schirm	0,00980	0,1285	0,9393
$\beta_2$	ln (Pflanzenzahl pro Hektar)	0,45112	0,0813	<b>0,0000***</b>
$\beta_3$	Entwicklungsstadium	0,76279	0,1795	<b>0,0000***</b>
LMM: Durchmesser stärkster Totast [cm]		Box-Cox-transformiert		
$\beta_0$	Intercept	-0,24478	0,0938	<b>0,0099**</b>
$\beta_1$	Schirm	-0,27066	0,0649	<b>0,0000***</b>
$\beta_2$	Pflanzenzahl pro Hektar	$3,33 \times 10^{-5}$	< 0,0001	<b>0,0021**</b>
$\beta_3$	Entwicklungsstadium	0,38792	0,0917	<b>0,0000***</b>
LMM: grünastfreie Schaftlänge [cm]		Box-Cox-transformiert		
$\beta_0$	Intercept	5,36940	0,9838	<b>0,0000***</b>
$\beta_1$	Schirm	0,14540	0,4137	0,7257
$\beta_2$	Pflanzenzahl pro Hektar	0,00019	0,0001	<b>0,0264*</b>
$\beta_3$	Entwicklungsstadium	0,01499	0,6638	0,9820
$\beta_2 \times \beta_3$	Pflanzenzahl $\times$ Entwicklungsstadium	0,00055	0,0001	<b>0,0000***</b>

Äußerst klare Zusammenhänge ergaben sich hinsichtlich der untersuchten Faktoren für den Astreinigungsprozess, gemessen an der *grünastfreien Schaftlänge* der Buchen. Dem Schirmverlust ( $p = 0,7257$ ) sowie dem Entwicklungsstadium ( $p = 0,9820$ ) als Einzeleffekte kommt in diesem Zusammenhang keinerlei Bedeutung zu. Ausschlaggebend ist dagegen die Pflanzendichte im Voranbau. Je höher diese ist, desto länger ist auch der grünastfreie Schaftabschnitt (Abbildung 28). Wirklich deutlich tritt dieser Effekt aber erst zutage, wenn die Voranbauten den Dickungsschluss erreicht haben. Das belegt die höchst signifikante Wechselwirkung ( $\beta_2$ ) Pflanzenzahl  $\times$  ( $\beta_3$ ) Stadium, welche zugleich den Haupteffekt dieses Modells darstellt (Tabelle 16). Sie äußert sich in einem deutlich stärkeren Anstieg der grünastfreien Schaftlänge bei den Voranbauten nach Dickungsschluss als Reaktion auf steigende Pflanzendichten. Innerhalb des untersuchten Stammzahlspektrums überschreiten die modellierten Werte im Stadium vor Dickungsschluss 56 cm nicht. Im Gegensatz dazu werden nach Dickungsschluss bereits bei Pflanzenzahlen von 6.000 St./ha grünastfreie Schaftlängen von durchschnittlich 97–100 cm erreicht. In den dichtesten Beständen mit 12.000 St./ha schreitet die Astreinigung gemäß linearem Modell auf bis zu 261 cm voran.



**Abbildung 28:** Die grünastfreie Schaftlänge der Buchen dient als Indikator der natürlichen Astreinigung. Die Darstellung erfolgt in Abhängigkeit von der Pflanzendichte pro Hektar, getrennt nach Entwicklungsstadium und Überschirmung.

## 4.5 Diskussion

### 4.5.1 Schirmverlust, Grünastentwicklung und Qualität

Das Qualitätspotenzial junger Laubholzbestände hängt maßgeblich von Zustand, Dimension und Häufigkeit des Auftretens natürlicher, äußerer Merkmale der Bäume ab (SONDERMANN 1979). Eine wichtige Kategorie bilden die Astmerkmale, welche oft unter dem Begriff der „Astigkeit“ („branchiness“) subsummiert werden (z. B. MÄKINEN 2002; MÄKINEN & HEIN 2006; HEIN ET AL. 2007b; HEIN ET AL. 2008). Dieser Faktor wurde in der vorliegenden Arbeit anhand verschiedener Parameter untersucht.

Die *Grünastdichte* ist Ausdruck der Intensität der Astbildung und primären Verzweigung eines Baumes. Sie vermittelt einen grundlegenden Eindruck von der Qualität junger Laubhölzer (HAGEMANN 2005; HAGEMANN ET AL. 2013), wobei niedrige Astdichten als qualitativ vorteilhaft angesehen werden (SONDERMANN 1979). Die vorliegenden Ergebnisse beweisen, dass die Grünastdichte durch ein komplexes Wirkungsgefüge gesteuert wird, wobei sowohl Überschirmung und Bestandesdichte als auch deren Interaktion eine signifikante Rolle spielen. Hinsichtlich der Beziehung von Überschirmung und Astdichte bei der Buche sind die Angaben in der Literatur recht eindeutig. Nur HAGEMANN ET AL. (2013) stellten keinen Effekt unterschiedlich großer Kronendachlücken fest. Alle anderen Autoren dokumentierten eine positive Korrelation zwischen der Strahlungsversorgung und der Anzahl der in einem definierten Bereich auftretenden Grünäste (CANHAM 1988; WELANDER & OTTOSSON 1997; PETRITAN ET AL. 2010). Ergänzend dazu erklärt STORCH (2011), dass geringe Strahlungswerte die Astbildung doppelt negativ beeinflussen, indem sie zum einen den Austrieb vorhandener Knospen durch Ressourcenmangel vermindern und dieser zum anderen zugleich die Produktion neuer Knospen einschränkt. Die eigenen Ergebnisse stützen diesen Befund, legen

aber zugleich eine differenzierte Betrachtungsweise unter gleichzeitiger Einbeziehung der Bestandesdichte nahe. Nur bei Pflanzenzahlen bis 6.000 St./ha lagen die Astdichten überschirmter Buchen unter jenen freigestellter Voranbauten. Oberhalb dieses Grenzwertes kehrte sich das Verhältnis um. Demnach ist die Grünastdichte nicht allein durch die Wirkung des Fichtenschirms zu begründen.

Vielmehr leistet die Pflanzenzahl des Voranbaus den maßgeblichen Beitrag zur Erklärung der Grünastdichte. Steigen die Pflanzenzahl und damit die intraspezifischen Konkurrenz, treten weniger Grünäste auf (LEONHARDT 2006; STORCH 2011; BARBEITO ET AL. 2014). Es stellte sich heraus, dass dieser Effekt auf Sturmflächen wesentlich stärker ausgeprägter ist als unter Fichtenschirm. Dahin gehend wurde mehrfach nachgewiesen, dass die Astbildung eine enge Beziehung zur Vitalität des Baumes aufweist. Je wüchsiger ein Baum und je geringer dessen H/D-Wert ist, desto mehr Äste werden gebildet (MLINSEK & BAKKER 1990; MÄKINEN & COLIN 1999; MÄKINEN & HEIN 2006; HEIN ET AL. 2007b; STORCH 2011). Gemessen am H/D-Wert sind die Buchen auf Sturmflächen bei niedriger Bestandesdichte am vitalsten (vgl. Kapitel 3.4, S. 63 ff.). Es erscheint also plausibel, dass hier zugleich die größten Grünastdichten auftreten. Aufgrund dieser hohen Wüchsigkeit stellt sich mit zunehmender Bestandesdichte aber auch eine sehr starke Konkurrenz ein. Folglich verläuft die standraumabhängige Differenzierung der Grünastdichte auf der Freifläche intensiver als unter Schirm. Für die Qualität bedeutet dies, dass freigestellte Buchen bei Pflanzenzahlen von über 6.000 St./ha qualitativ günstigere Astdichten besitzen als solche unter Fichtenschirm.

Mit steigendem Alter sinkt die Astanzahl pro Längeneinheit signifikant (PRÉVOSTO & CURT 2004; BARBEITO ET AL. 2014), sodass die Buchen im Stadium nach Dickungsschluss unter sonst gleichen Bedingungen geringere Grünastdichten in der Krone besitzen. HAGEMANN ET AL. (2013) konnten eine signifikant negative Korrelation zwischen Baumhöhe und Grünastanzahl in den unteren 3 m des Schafts nachweisen. Eine Ursache hierfür ist, dass innerhalb der Krone wachstumsbedingt zunehmend Äste absterben (vgl. TIEBEL 2014), was sich wiederum positiv auf die Qualität auswirkt.

Der *Durchmesser des stärksten Grünasts* ist eines der wichtigsten Qualitätsmerkmale (MÄKINEN & HEIN 2006). Er ist eng mit anderen Asteigenschaften, z. B. Ansatzwinkel und Astlänge, korreliert (KINT ET AL. 2010) und gilt darum als sicherer Indikator des natürlichen Astreinigungspotenzials und somit der Qualitätsentwicklung eines Baumes (HEIN & SPIECKER 2007; HEIN 2008). In dieser Untersuchung wurden sehr klare Beziehungen zu Überschirmung

und Bestandesdichte sowie Entwicklungsstadium herausgearbeitet. Über eine negative Korrelation zwischen dem Astdurchmesser vorangebauter Buchen und der Intensität der Altholzüberschirmung wurde bereits berichtet (HERTRAMPF 2009; LINNERT 2009). Infolgedessen wachsen Buchen unter Fichtenschirm feinastiger auf (AMMER 2000; LEDER & WEIHS 2000), während solche auf der Freifläche durch stärkere Äste geprägt sind (LE TACON 1985). Die eigenen Ergebnisse bestätigen dies uneingeschränkt. Ungeachtet aller weiteren Einflussfaktoren stiegen die Astdurchmesser der Buchen infolge des plötzlichen Schirmverlusts drastisch an, was erhebliche negative Auswirkungen auf die Qualität zur Folge hat. So ist vor allem eine Verzögerungen der natürlichen Astreinigung zu befürchten (ERTELD & ACHTERBERG 1954; HEIN & SPIECKER 2007; KINT ET AL. 2010). Der Schirmverlust stellt unter diesen Rahmenbedingungen somit den Haupteinflussfaktor dar.

Gleichwohl kommt auch der Pflanzendichte im Voranbau und somit der intraspezifischen Konkurrenz ein hoher Stellenwert im Qualifizierungsprozess zu. Zahlreiche Untersuchungen an verschiedenen Baumarten belegen einstimmig, dass die Astdimension infolge abnehmender Standraumverfügbarkeit sinkt, was sich wiederum positiv auf die Qualität auswirkt (MÄKINEN 2002; MÄKINEN & HEIN 2006; HEIN ET AL. 2007b; HEIN ET AL. 2008; RUMPF & PETERSEN 2008). Analog zur eigenen Beobachtung konnten FAHLVIK ET AL. (2005) an *Pinus sylvestris* (L.) nachweisen, dass steigende Bestandesdichten vor allem im Stammzahlbereich von bis zu 3.000 St./ha eine deutliche, mindernde Wirkung auf das Astwachstum ausüben, während dieser Effekt bei einer weiteren Pflanzenzahlerhöhung nachlässt. Die standraumabhängige Differenzierung läuft unabhängig von der Überschirmung ab, sodass es auch auf der Freifläche möglich ist, extremer Starkastigkeit durch einen entsprechend hohen Seitendruck entgegenzuwirken (vgl. AMMER 2000). Dass die Astdimensionen aber selbst bei höchster Bestandesdichte deutlich über denen von Bäumen unter Schirm liegen, zeigt einerseits, dass dieser Spielraum sehr begrenzt ist. Andererseits beweist es erneut, dass Schirm- und Seitendruck nicht gegenseitig ersetzbar sind (SPELLMANN 2005), weshalb beste Qualitäten nur unter Fichtenschirm bei zugleich hoher Pflanzendichte erreicht werden (LEDER & WEIHS 2000; LEONHARDT & WAGNER 2006; HERTRAMPF 2009). Der Einzeleffekt der Pflanzenzahl im Voranbau bleibt hinsichtlich seiner Bedeutung für den Astdurchmesser in den untersuchten Bestandessituationen deutlich hinter dem des Schirms zurück.

Selbst ein vollständig gegebener Dickungsschluss schützt im Fall einer plötzlichen Freistellung nicht vor dem gravierenden Anstieg der Astdimension. In beiden

Entwicklungsstadien traten identische Reaktionsmuster auf. Dies verwundert in Anbetracht der zu erwartenden stärkeren Konkurrenz in geschlossenen Buchendickungen ein wenig, folgt aber den Ergebnissen der Radialzuwachsanalyse an ebendiesen Ästen (vgl. Kapitel 3.4.3, S. 69). Offensichtlich wurden durch den plötzlichen Wegfall der Altholzkonzurrenz so viele Ressourcen frei, dass selbst die Buchen in dicht geschlossenen Voranbauten umfänglich davon profitierten.

Obwohl die Konsequenzen der gegenwärtigen Astigkeit für die Qualität des hiebsreifen Buchenholzes derzeit kaum abzuschätzen sind, lohnt ein Vergleich mit den sortierrelevanten, kritischen Astdimensionen der Rahmenvereinbarung für den Rohholzhandel in Deutschland (RVR). Für Rundholz der Qualitätsklasse B dürfen maximale Astsiegelhöhen von 10 cm nicht überschritten werden (DSH 2012). Dies entspricht einem überwallten Astdurchmesser von etwa 5 cm (vgl. ERTELD & ACHTERBERG 1954). Bei gesunden, nicht überwallten Ästen werden Dimensionen bis zu 10 % des Mitteldurchmessers des Stamms (also 5–6 cm) toleriert. Die Astdimensionen der untersuchten Buchen auf den KYRILL-Flächen kommen diesen Grenzwerten schon jetzt sehr nahe und sind hinsichtlich der Qualitätserwartung demzufolge kritisch zu sehen.

Ein etwas anderes Bild ergibt sich für den relativen Astdurchmesser *ASIX*. Hinter diesem Astindex verbirgt sich die Idee, dass Äste identischer Dimension umso stärker negativ zu bewerten sind, je geringer ihr Stammdurchmesser ist (vgl. STRUCK & DOHRENBUSCH 2000). Dadurch wird das höhere Astreinigungs- und Überwallungspotenzial wuchskräftiger Bäume in die Qualitätsbeurteilung einbezogen (vgl. STRUCK & DOHRENBUSCH 2000; HAGEMANN ET AL. 2013). Hinsichtlich der Wirkung des Altholzschirms auf den relativen Astdurchmesser sind in der Literatur unterschiedliche Meinungen zu finden. Einerseits schildern einige Autoren, dass der *ASIX* nicht von der Überschirmung abhängt (LINNERT 2009; HAGEMANN ET AL. 2013). Andererseits wird von einer signifikant geringeren Zahl starker Äste (DIACI & KOZJEK 2005) und einem sinkenden *ASIX* infolge abnehmender Überschirmung berichtet (LEONHARDT 2006). Völlig konträr dazu wurden die größten *ASIX*-Werte in der eigenen Untersuchung auf den Freiflächen bei geringer Pflanzenzahl im Voranbau gefunden. Dies deutet darauf hin, dass das Wachstum der stärksten Grünäste hier im Vergleich zum Stamm durch die Freistellung überproportional begünstigt wurde. Dadurch sind diese Buchen auch relativ gesehen am starkastigsten. Dies untermauert die Ergebnisse der absoluten Astdurchmesser, wonach weitständige Buchenvoranbauten auf der Freifläche die deutlich schlechteste Qualität aufweisen.



Allerdings gelten diese Aussagen ausschließlich bei Pflanzendichten von unter 8.500 St./ha. Die freigestellten Buchen werden mit zunehmender Bestandesdichte feinastiger, weshalb sie oberhalb des genannten Grenzwerts sogar einen geringeren ASIX besitzen als die Buchen unter Schirm. Steigt die intraspezifische Konkurrenz, wird das Durchmesserwachstum des stärksten Grünasts in Relation zu jenem des Stamms reduziert, sodass der ASIX sinkt (HAGEMANN 2005; TIEBEL 2014). Unter Fichtenschirm war hingegen kein nennenswerter Effekt der Pflanzendichte im Voranbau nachzuweisen. Auch andere Autoren sehen nur sehr begrenzte Möglichkeiten, um durch innerartliche Konkurrenz eine Reduktion des Astwachstums in Relation zum Stamm herbeizuführen (MÄKINEN 1996; STRUCK & DOHRENBUSCH 2000; MÄKINEN & HEIN 2006). Von der hier festgestellten Wechselwirkung von Pflanzendichte und Überschirmung, welche gerade im Kontext der Qualitätsentwicklung nach Schirmverlust von besonderer Bedeutung ist, wurde in der Literatur dagegen noch nicht berichtet. Folglich sind hohe Pflanzenzahlen im Voranbau offensichtlich ein adäquates Mittel, um die relative Astigkeit von Buchen auch bei plötzlicher Freistellung unter 40 % zu halten. Solche ASIX-Werte sind mit Buchen unter Fichtenschirm vergleichbar (TIEBEL 2014).

Die grundsätzliche Eignung des ASIX als Qualitätsindex ist kritisch zu diskutieren. Er suggeriert, dass Buchen auf einer Freifläche bei hoher Bestandesdichte bessere Qualitäten besitzen als vergleichbare Bestände unter Schirm, obwohl die absoluten Astdimensionen freigestellter Bäume erheblich größer waren (vgl. LINNERT 2009). Diese Einschätzung ist vor allem mit Blick auf die Astreinigung kritisch zu sehen. Zwar können wuchskräftige Bäume aufgrund ihres hohen Durchmesserzuwachses abgestorbene Äste zügiger überwallen (MÄKINEN 2002; HEIN & SPIECKER 2007; STORCH 2011). Grundsätzlich steigen Lebensdauer, Überwallungszeitraum, die Dimension des asthaltigen Kerns und auch der Schwarzastanteil aber mit zunehmender Astdimension an, was sich wiederum negativ auf die Qualität auswirkt (ERTELD & ACHTERBERG 1954; HEIN 2008). Aus diesem Grund wird unter Berücksichtigung der eigenen Ergebnisse empfohlen, die Qualitätseinschätzung nicht allein auf Basis der relativen Astigkeit vorzunehmen, sondern darüber hinaus auch absolute Werte einzubeziehen. Eine relative Betrachtungsweise eignet sich dagegen sehr gut zum Vergleich von Beständen in unterschiedlichen Entwicklungsstadien. So wurde gezeigt, dass das fortgeschrittene Wachstum der Voranbauten nach Dickungsschluss zwar größere absolute Astdurchmesser (PRÉVOSTO & CURT 2004; BARBEITO ET AL. 2014), jedoch leicht niedrigere ASIX-Werte im Vergleich zum Stadium vor Dickungsschluss hervorruft (HAGEMANN ET AL. 2013).

Für das Produktionsziel Buchenqualitätsholz werden möglichst horizontal, das heißt in einem *Winkel* von etwa 65–90° ansetzende Äste angestrebt (KURTH 1946; HENGST 1964). Steile Äste mit entsprechend kleinem Winkel weisen dagegen auf eine verzögerte Astreinigung und folglich schlechte Qualität hin (RICHTER 1990; STORCH 2011). Die Ausprägung der Astwinkel wurde in der vorliegenden Arbeit allein durch die Überschirmung erklärt. So nahmen die Astwinkel der Buchen infolge der Freistellung und der dadurch erhöhten Strahlungsverfügbarkeit deutlich ab (BROWN 1952; CANHAM 1988; CAO 2001). KURTH (1946) beziffert die Differenz der Astwinkel von überschirmten sowie im Freiland gewachsenen Buchen auf etwa 10° und stützt damit die vorliegenden Ergebnisse. Eine horizontale Ausrichtung der Äste unter Beschattung dient der Optimierung der Blattflächenanordnung, wodurch die Effektivität der Lichtinterzeption steigt (BROWN 1952; SONE ET AL. 2006; TIEBEL 2014). Die steileren Astwinkel der Buchen auf Freiflächen fungieren hingegen als Schutzmechanismus vor extremer Sonneneinstrahlung und damit verbundenen Transpirationsverlusten (CAO 2001). Aus qualitativer Sicht sind Letztere ausgesprochen negativ zu bewerten, da steilere Äste meist auch länger sind, wodurch ihnen ein besserer Anschluss an das Kronendach und eine effektivere Strahlungsaufnahme gelingt. Dadurch leisten sie größere Durchmesserzuwächse, was wiederum ihre Überlebenswahrscheinlichkeit erhöht, im Umkehrschluss aber eine verzögerte Astreinigung zur Folge hat (KINT ET AL. 2010; STORCH 2011). Ferner sind die starken, steilwinkligen Äste der Freiflächenbuchen ein Anzeichen für eine geringe Apikaldominanz der Terminalknospe und weisen auf eine erhöhte Tendenz zur qualitätsmindernden Zwieselbildung und Schaftauflösung hin (RICHTER 1990; LEDER & HILLEBRAND 2001).

Aus physiologischer Sicht besonders interessant erscheint die Tatsache, dass die Buchen innerhalb von nur sechs Jahren nach ihrer Freistellung in der Lage waren, ihre Astwinkel um 10° zu verändern und sich dadurch morphologisch an die neuen Umweltbedingungen zu adaptieren. Äste sind demnach nicht starr an ihren Entstehungszustand gebunden; vielmehr variiert ihre Ausrichtung im Lauf des Lebens (KRAHL-URBAN 1962). Diese Plastizität der Astwinkel ist ein wichtiges Instrument der Anpassungsstrategie schattentoleranter Baumarten und zielt auf eine stets effektive Strahlungsaufnahme ab (HONDA & FISHER 1978; SONE ET AL. 2006). Dass auch bereits verholzte Pflanzenteile wie die stärksten Grünäste der hier untersuchten Buchen zur morphologischen Anpassung beitragen, beweisen die Arbeiten von ROLOFF (1986) sowie jüngst von COLLET ET AL. (2011). Die Autoren beobachteten, dass sich unter Schirm plagiotrop wachsende junge Buchen infolge einer Freistellung umgehend

aufrichteten. Vier Jahre nach der Schirmöffnung wurde eine Änderung des Neigungswinkels um 18° in vertikale Richtung dokumentiert (COLLET ET AL. 2011).

#### 4.5.2 Schirmverlust und Astreinigung

Grundlage der Wertholzproduktion aus Buche ist das erfolgreiche und zügige Durchlaufen der Astreinigung (STORCH 2011). Zumindest für die Initialphase dieses Prozesses weisen die vorliegenden Ergebnisse darauf hin, dass die Astmortalität maßgeblich durch die Konkurrenz im Voranbau und weniger durch die Überschirmung gesteuert wird. So stellte sich heraus, dass das quantitative *Auftreten primärer Totäste* gänzlich unabhängig von der Überschirmung ist. Hingegen stieg die Totastanzahl infolge zunehmender Pflanzendichte im Voranbau deutlich an. KINT ET AL. (2010) sowie STORCH (2011) hoben in diesem Kontext die Bedeutung der intraspezifischen Konkurrenz hervor und stellten fest, dass Buchen mit geringem Durchmesserzuwachs bzw. hohem H/D-Wert einen höheren Anteil an toten Ästen aufweisen als wüchsiger Individuen. Umgekehrt überleben Äste bei großem Standraum und daher hohem Durchmesserzuwachs länger (MÄKINEN 1999, 2002; HEIN ET AL. 2008; STORCH 2011). Dies trifft auch auf die eigene Untersuchung zu, denn die größten Totastzahlen traten in den dichtesten Voranbauten auf, welche zugleich die geringsten Wurzelhalsdurchmesser, dafür aber die höchsten H/D-Werte vorweisen konnten (vgl. Kapitel 3.4.1. S. 63). Mit fortschreitender Entwicklung verstärkt sich die Konkurrenz im Voranbau. Aus diesem Grund steigen die Totastzahlen infolge einer zunehmenden Bestandesdichte im Stadium nach Dickungsschluss wesentlich deutlicher an, als dies vor Dickungsschluss der Fall ist.

Der *Durchmesser des stärksten Totasts* wurde als einziger Astreinigungsparameter sowohl vom Schirmverlust als auch von der Pflanzenzahl im Voranbau beeinflusst. Unter sonst vergleichbaren Bedingungen traten in den freigestellten Voranbauten stärkere Totäste auf als unter Fichtenschirm. Analog dazu fand LEONHARDT (2006) die höchsten Totastdurchmesser vorangebauter Buchen bei geringstem Schirmdruck. DIACI & KOZJEK (2005) dokumentierten zunehmende Dichten starker Totäste mit steigender Lückengröße im Oberstand. Da die Überlebenswahrscheinlichkeit eines Asts positiv mit seinem Durchmesser korreliert ist (MÄKINEN & COLIN 1999; WEISKITTEL ET AL. 2007; STORCH 2011), gelten hohe Totastdurchmesser als sicherer Indikator für eine intensive Astreinigung (HAGEMANN 2005; LEONHARDT 2006). Die dickeren Totäste der Buchen auf Sturmflächen sind demnach eine Konsequenz der Wachstumssteigerung infolge der Freistellung und der damit einhergehenden Konkurrenzintensivierung in den betreffenden Voranbauten. Wesentliche Triebkraft der

Astmortalität ist also die intraspezifische Konkurrenz. Sie ist dafür verantwortlich, dass mit steigender Bestandesdichte zunehmend stärkere Äste absterben (MÄKINEN 1996). Die größten Totastdurchmesser treten demzufolge bei geringstem Schirmdruck und zugleich höchstem Seitendruck auf (LEONHARDT 2006). Mit Blick auf den qualitativ erwünschten Astmortalitätsprozess hat die Freistellung bisher offensichtlich keinen negativen Effekt, denn die insgesamt größten Totastdurchmesser waren in den dichtesten Voranbauten auf Freiflächen zu verzeichnen.

Die *grünastfreie Schaftlänge* charakterisiert das vertikale Voranschreiten der Astmortalität. An den untersuchten Voranbauten war keine Beeinträchtigung dieses Vorgangs durch den Schirmverlust erkennbar. Die Astreinigung läuft demzufolge unabhängig von der Überschildung ab (WILHELM ET AL. 1999b; HAGEMANN ET AL. 2013). Hingegen erwies sich die Seitendruckkonkurrenz erneut als zentrale Steuergröße der Astmortalität. Sinkt aufgrund einer zunehmenden Pflanzendichte im Voranbau die durchschnittliche Standraumverfügbarkeit der Buchen, schlägt sich dies in einem konsequenten Anstieg der grünastfreien Schaftlänge nieder (KRAHL-URBAN 1963; MUHLE & KAPPICH 1979; RUMPF & PETERSEN 2008; KINT ET AL. 2010; STORCH 2011). Ursächlich hierfür ist, dass tief am Stamm ansetzende Äste namentlich bei hohen Bestandesdichten frühzeitig durch darüber befindliche Äste beschattet werden (LANNER 1985; MESSIER & NIKINMAA 2000). Dadurch entsteht eine asymmetrische Konkurrenzsituation innerhalb der Krone, wobei die Ressourcenallokation zugunsten besser strahlungsversorgter und somit produktiverer Äste umverteilt wird (TAKENAKA 2000; HENRIKSSON 2001; STORCH 2011). Gemäß der Theorie der Astautonomie werden stark beschattete, ineffektive Seitentriebe von der Ressourcenversorgung des Baums isoliert, sobald deren Kohlenstoffbilanz negativ ist. Sie sterben daraufhin ab (SPRUGEL ET AL. 1991; MESSIER & NIKINMAA 2000; HENRIKSSON 2001). Ausschlaggebend für die Astreinigung ist folglich nicht die Beschattung des gesamten Baums, sondern die individuelle Strahlungsversorgung des einzelnen Asts (HENRIKSSON 2001).

Der zur Astreinigung erforderliche Seitendruck wird erst nach Eintritt des Dickungsschlusses erreicht; dies belegen die unabhängig von der Pflanzendichte geringen grünastfreien Schaftlängen im Stadium vor Dickungsschluss. Nach KINT ET AL. (2010) erfolgt die Astreinigung umso stärker, je älter und höher die Buchen sind. LANGHAUSEN (2009) misst dem standortsspezifischen Höhenwachstum sogar einen größeren Stellewert für die Astreinigung bei als der Bestandesdichte. In der Arbeit von LEONHARDT (2006) war erst ab Baumhöhen von 4,5 m überhaupt eine Seitendruckwirkung zu erkennen. Der

Astreinigungsprozess wird demnach durch eine Wechselwirkung von Pflanzenzahl pro Hektar und Entwicklungsstadium bzw. Alter der Voranbauten gesteuert. Mit Blick auf die Qualifizierung der Voranbauten wirken hohe Pflanzendichten also in doppelter Hinsicht positiv: Sie bewirken ein zügiges Eintreten des Dickungsschlusses und setzen infolgedessen die zur Astreinigung erforderliche Seitendruckkonkurrenz in Gang (LEDER & WEIHS 2000; HERTRAMPF 2009).

In der Gesamtbetrachtung gehen vom Schirmverlust bislang keine negativen Auswirkungen auf die Astreinigung aus. Dies ist vermutlich dadurch zu begründen, dass die tief ansetzenden Buchenäste zum Freistellungszeitpunkt bereits stark beschattet waren und von der erhöhten Strahlungszufuhr weitgehend unbeeinflusst blieben (MESSIER & NIKINMAA 2000). Darüber hinaus geht das infolge der Freistellung gesteigerte Wachstum (Kapitel 3.4, S. 63) mit einer intraspezifischen Konkurrenzintensivierung einher. Dadurch wird vor allem die Astreinigung gefördert. Inwiefern sich der Schirmverlust jedoch langfristig auf die Astmortalität auswirkt, ist derzeit nicht abschließend zu beantworten. Die deutlich gestiegenen Grünstammdurchmesser der Buchen auf den Sturmflächen sowie deren steilere Astwinkel lassen für die Zukunft im Vergleich zu Voranbauten unter Fichtenschirm jedoch eine Verzögerung der Astreinigung erwarten (HENGST 1964; KINT ET AL. 2010).

#### **4.6 Waldbauliche Schlussfolgerung**

Buchenvoranbauten sind ein adäquates Mittel für den Waldumbau von Fichtenreinbeständen. Die stetig steigende Sturmschadensgefährdung, denen Fichtenschirme ausgesetzt sind, wirft jedoch die Frage auf, inwiefern die mit Buchenvoranbauten verbundenen Qualitätserwartungen im Fall eines kalamitätsbedingten Schirmverlusts überhaupt realistisch sind. Die vorliegenden Ergebnisse lassen diesbezüglich einige waldbaulich relevante Schlussfolgerungen zu:

Der Fichtenschirm hat eine herausragende Bedeutung für die Qualifizierung von Buchenvoranbauten. Im Halbschatten bilden Buchen weniger, dafür aber feine und eher horizontal ausgerichtete Äste aus. Umgekehrt sind Buchen auf Sturmflächen nach nur sechs Jahren im Freiland erheblich stark- und steilastiger. Ein plötzlicher Schirmverlust hat demnach grundsätzlich gravierende Qualitätseinbußen zur Folge. Deshalb muss die Stabilitätssituation der Fichtenbestände zukünftig stärker als bisher in die Waldumbauplanung integriert werden. Frühzeitig beginnende, stabilitätsorientierte Durchforstungen tragen zu einer deutlichen Senkung des Sturmwurftrisikos bei (LEIBUNDGUT 1969; MITSCHERLICH 1974;

ALBRECHT 2009; HÖLLERL 2009). Mit der Einbringung der Buche in die Fichtenbestände sollte zudem möglichst früh begonnen werden, da das Windwurfisiko aufgrund der mit dem Alter steigenden Baumhöhe stetig wächst (KÖNIG 1995; DOBBERTIN 2002; KÖLLING ET AL. 2009; SCHMIDT ET AL. 2010; ALBRECHT ET AL. 2012).

Hohe Pflanzenzahlen im Voranbau wirken sich qualitativ positiv auf die Astigkeit aus. Dies gilt unabhängig von der Überschirmung, sodass eine Kompensation des Freistellungseffekts durch hohen Seitendruck in begrenztem Umfang möglich ist. So konnte für die meisten Astparameter auch auf Sturmflächen eine Qualitätsverbesserung infolge steigender Bestandesdichten nachgewiesen werden. Lediglich die Grünastdichte sowie der relative Astdurchmesser ASIX erreichten bei hohen Bestandesdichten das Niveau überschirmter Buchen. Insgesamt waren die Qualitäten dennoch deutlich schlechter als die von Buchen unter Fichtenschirm. Die Schirmwirkung kann demnach nicht durch einen starken Seitendruck ersetzt werden (LEDER & WEIHS 2000; SPELLMANN 2005; LEONHARDT & WAGNER 2006). Hohe Pflanzendichten stellen folglich ein adäquates Mittel dar, um freistellungsbedingte Qualitätsverluste zu mindern, nicht jedoch, um sie zu verhindern.

Als für die qualitative Entwicklung der Buchen nachrangig erwies sich der Umstand, ob die Freistellung vor oder nach Dickungsschluss eintrat. In beiden Fällen trat eine erhöhte Bildung starker, steiler Äste ein. Dies wird auch durch die hohe intraspezifische Konkurrenz in den Buchendickungen nicht verhindert. Das Entwicklungsstadium zum Freistellungszeitpunkt hat somit von allen untersuchten Faktoren die geringste Bedeutung für die weitere Qualitätsentwicklung.

Ein etwas anderes Bild ergab sich für die Astreinigung, welche in keiner Weise durch den Schirmverlust beeinträchtigt wurde. Treibende Kraft ist hier allein die intraspezifische Konkurrenz. Hohe Pflanzenzahlen bewirken einen zügigen Dickungsschluss sowie eine intensive Seitendruckkonkurrenz und beschleunigen dadurch das Absterben der Äste (KINT ET AL. 2010).

Grundsätzlich zeigen enge Pflanzverbände in Kombination mit einem lockeren bis lichten Fichtenschirm ausgesprochen positive Auswirkungen auf die Qualität. In Verbindung mit dem Produktionsziel Buchenwertholz sollten Mindestpflanzenzahlen von 5.000–6.000 St./ha darum keinesfalls unterschritten werden (KOCH 1992; LEONHARDT & WAGNER 2006; RUMPF & PETERSEN 2008). Vor allem anhand der relativen Astigkeit nach der Freistellung, aber auch der Astreinigung wurde klar, dass noch höhere Pflanzenzahlen eine weitere deutliche



Qualitätssteigerung nach sich ziehen, weshalb 8.000–10.000 Buchen pro Hektar als optimal zu bewerten sind (KLEIN 1983; OTTO 1985; SCHENK 1994; SACHSENFORST 2013b).

Die Ergebnisse legen zudem eine risikoabhängige Differenzierung der Pflanzenzahlen beim Waldumbau nahe. Nur bei gegebener Stabilität des Fichtenschirms ist das Produktionsziel Buchenwertholz realistisch, sodass kostenintensive Voranbauten mit den oben genannten Pflanzendichten gerechtfertigt erscheinen. Bei einer erhöhten Prädisposition des Fichtenschirms gegenüber Kalamitäten wird stattdessen ein extensiver Voranbau mit reduzierter Pflanzenzahl empfohlen. Dieser zielt im Sinn eines nachhaltigen Umbaus primär auf die Stabilisierung der Waldökosysteme durch eine standortgerechte Baumartenmischung ab und trägt zu einer höheren Flexibilität der zukünftigen Waldbewirtschaftung bei (WAGNER 2007, 2008).

#### **4.7 Zusammenfassung**

Gegenstand dieser Untersuchung sind die Auswirkungen eines unplanmäßigen, abrupten Verlusts des Fichtenschirms auf qualitätsrelevante Astmerkmale sowie die Astreinigung vorangebauter Buchen (*Fagus sylvatica* L.). Ferner sollte geklärt werden, inwiefern das Entwicklungsstadium (Dickungsschluss) sowie die Pflanzenzahl pro Hektar im Voranbau in diesem Zusammenhang von Bedeutung sind. Dazu wurden 29 mit Buche vorangebaute Fichtenbestände des Thüringer Waldes und des Erzgebirges ausgewählt, darunter 17 mit sturmbedingtem Schirmverlust durch den Orkan KYRILL im Januar 2007.

Die Erhebung der qualitätsrelevanten Grün- und Totastmerkmale am Einzelbaum erfolgte gemäß einem Aufnahmestandard für junge Laubhölzer (vgl. BÖRNER ET AL. 2003). Darüber hinaus wurden der Astindex ASIX (vgl. STRUCK & DOHRENBUSCH 2000) sowie die Grünastdichte pro Meter Kronenlänge berechnet. Zur statistischen Auswertung wurden generalisierte sowie lineare gemischte Modelle verwendet. Die Abbildung der Qualitätsmerkmale geschah im Modell über eine lineare Beziehung aus den festen Effekten Schirm, Pflanzenzahl pro Hektar und Entwicklungsstadium des Voranbaus.

Sechs Jahre nach dem Schirmverlust sind bei den freigestellten Buchen signifikant größere Astdurchmesser bei zugleich steileren Astwinkeln zu erkennen. Zumindest bei geringen Pflanzendichten stiegen auch Grünastdichte und ASIX erheblich an. Mit zunehmender Pflanzenzahl im Voranbau wurden die Buchen feinastiger, während der Astwinkel unbeeinflusst blieb. ASIX und Grünastdichte sanken nur auf der Freifläche merklich,

erreichten dadurch aber ab Pflanzenzahlen von 8.500 St./ha bzw. 6.000 St./ha niedrigere Werte als Buchen unter Schirm. Zwischen den beiden Entwicklungsstadien besteht hinsichtlich der Wirkung des Schirmverlusts kein Unterschied. Totastanzahl pro Baum und grünastfreie Schaftlänge wurden durch die Freistellung nicht beeinflusst. Allerdings wurden auf der Freifläche stärkere Totäste vorgefunden. Mit zunehmender Pflanzenzahl im Voranbau stiegen Anzahl und Durchmesser der Totäste sowie die grünastfreie Schaftlänge signifikant an. Am deutlichsten war dies bei Voranbauten nach Dickungsschluss zu erkennen.

Die Ergebnisse belegen, dass ein plötzlicher Schirmverlust grundsätzlich gravierende Qualitätsverluste zur Folge hat. Eine Kompensation dieses Effekts durch hohe Pflanzenzahlen im Voranbau ist nur sehr eingeschränkt möglich. Ein hoher Seitendruck kann den fehlenden Schirmdruck demnach nicht kompensieren. Sehr gute Qualitätsmerkmale, das heißt Buchen mit gering dimensionierten, horizontal ausgerichteten Ästen und zügiger Astreinigung, sind nur durch eine Kombination aus langfristig stabiler Überschirmung und hoher Pflanzendichte im Voranbau zu erzielen.

## **5 Kronenmorphologie, Qualität und Häufigkeit von Z-Baum-Anwärtern in sturmbedingt freigestellten Buchenvoranbauten**

### **5.1 Hintergrund und Zielstellung**

Die Buche (*Fagus sylvatica* L.) zeichnet sich durch eine enorme Plastizität ihrer Kronenmorphologie aus (STANCIOIU & O'HARA 2006a; BARBEITO ET AL. 2014). Diese Eigenschaft dient der Anpassung an variierende Lichtbedingungen, genauer gesagt der optimalen Strahlungsaufnahme unter Beschattung (CANHAM 1988; VALLADERES ET AL. 2002; VALLADERES & NIINEMETS 2008; COLLET ET AL. 2011). Doch auch aus waldbaulicher Sicht bringt die Flexibilität der Wuchsform erhebliche Vorteile mit sich. Sie bildet die Grundlage einer qualitativen Erziehung junger Buchen. Ein sehr wichtiges waldbauliches Instrument ist dabei der Altholzschirm. So wurde an zahlreichen Beispielen belegt, dass eine moderate Reduktion des Lichtangebots unter Schirm die Entwicklung der qualitativ erwünschten „edlen Halbschattform“ begünstigt (SAGHEB-TALEBI 1996; PETERSEN & WAGNER 1999; AMMER 2000; WEIHS & KLAENE 2000). Unter diesem Begriff wird eine Baumarchitektur mit durchgehender, ungeteilter Stammachse (Wipfelschäftigkeit) und gering dimensionierten sowie horizontal ansetzenden Ästen verstanden (KRAHL-URBAN 1953; HENGST 1964; RICHTER 1990; WEIHS & KLAENE 2000).

Neben dem Altholzschirm steuert auch die intraspezifische Konkurrenz die Wuchsform der Buchen maßgeblich. So zwingt ein geringer Standraum, beispielsweise bedingt durch hohe Pflanzendichten im Voranbau, die Buchen zur vertikalen Wuchsraumschließung mithilfe eines forcierten Höhenwachstums (KURTH 1946; LEDER & WEIHS 2000). Wipfelschäftige Bäume sind hierbei aufgrund ihrer durchgehenden Schaftachse gegenüber Individuen mit gezwieselter oder verbuschter Krone im Vorteil und setzen sich im Konkurrenzkampf folglich durch (FISCHER 2000). Dieser Prozess trägt wesentlich zur Qualitätssteigerung der Bestände bei. Demzufolge stellen Schirm- und Seitendruck die beiden wichtigsten Werkzeuge eines Waldbauers im Rahmen der Wertholzerziehung mit Buche dar. Auf Basis dieser Erkenntnisse wurde in der weiterführenden Arbeit von LEONHARDT & WAGNER (2006) explizit die kombinierte Wirkung vom Schirmdruck eines Fichtenbestands sowie vom Seitendruck im Buchenvoranbau untersucht. Die Autoren kamen dabei zu dem eindeutigen Resultat, dass Schirm- und Seitendruck bei gleicher Qualitätserwartung variabel kombiniert werden können, solange die Pflanzendichte im Voranbau 5.000 St./ha nicht unterschreitet. Diese Aussagen aus

der zuvor zitierten Arbeit gelten allerdings nur unter der Annahme, dass ein Mindestmaß an Überschirmung gegeben ist, das zudem langfristig bestehen bleibt.

Kaum bekannt sind bislang jedoch die Folgen einer abrupten Umweltänderung, z. B. infolge eines sturmbedingten Schirmverlusts, für die Kronenmorphologie und damit die Qualität vorangebauter Buchen. Lediglich ROLOFF (1986) schreibt in diesem Zusammenhang, dass die Buche über eine Vielzahl von Adaptionsmechanismen verfügt, um auf eine plötzliche Strahlungserhöhung flexibel reagieren zu können. Hinsichtlich der Qualität, insbesondere der Wipfelschäftigkeit, haben diese jedoch größtenteils negativ Auswirkungen (vgl. ROLOFF 1986). Untersuchungen in Freiflächenkulturen deuten in dieselbe Richtung. Bei fehlendem Schirmdruck sind vornehmlich unerwünschte Zwiesel und aufgelöste Kronen zu finden (LE TACON 1985; LEDER & HILLEBRAND 2001; OTT ET AL. 2003). Deshalb wurde oft die Empfehlung ausgesprochen, auf Freiflächen deutlich höhere Pflanzenzahlen einzusetzen, um den fehlenden Schirm durch entsprechenden Seitendruck zu substituieren (RICHTER 1990; KOCH 1992; OTT & LÜPKE 2006). Bisher liegen jedoch keine Erkenntnisse darüber vor, inwieweit große Pflanzendichten auch bisher überschirmte und an den Halbschatten adaptierte Buchenvoranbauten vor Qualitätseinbußen infolge einer abrupten Freistellung bewahren können.

Hier setzt die vorliegende Untersuchung an, indem die Qualitätserwartung von Buchenvoranbauten vor dem Hintergrund eines erhöhten Sturmwurftrisikos der Fichtenschirme betrachtet wird. Dazu wurden durch den Orkan KYRILL im Januar 2007 freigestellte Voranbauten sechs Jahre nach dem Schirmverlust hinsichtlich qualitätsrelevanter Stamm- und Kronenmerkmale analysiert. Folgende Fragestellungen wurden bearbeitet:

- Welche Auswirkungen hat ein plötzlicher Verlust des Fichtenschirms auf die Kronenmorphologie und folglich die Qualität vorangebauter Buchen?
- Können die Folgen eines Schirmverlusts (zumindest teilweise) durch hohe Pflanzendichten im Voranbau kompensiert werden?
- Sind die Auswirkungen des plötzlichen Schirmverlusts weniger dramatisch, wenn sich die Voranbauten bei der Freistellung bereits im Dickungsschluss befanden?
- Kann die in der waldbaulichen Praxis gebräuchliche gutachterliche Qualitätsansprache durch reproduzierbare, metrische Parameter erklärt und bestätigt werden?
- In welcher Weise wirkt sich eine plötzliche Freistellung auf die Häufigkeit von Z-Baum-Anwärtern in Buchenjungbeständen aus?

Zunächst wird das Qualitätspotenzial freigestellter Buchenvoranbauten unterschiedlicher Pflanzendichten und Entwicklungsstadien dargestellt. Aus den erzielten Ergebnissen werden dann Handlungsempfehlungen und mögliche Vorsorgemaßnahmen abgeleitet.

## 5.2 Material und Methoden

### 5.2.1 Erhebung von Steilästen und Zwieseln

Erfasst wurden Verzweigungsformen, die eine ausgesprochen negative Wirkung auf die Qualität von Buchen haben. Darunter fallen namentlich Steiläste und Zwiesel. Als *Steiläste* sind in dieser Arbeit Äste definiert, deren Durchmesser und Höhe mehr als 50 % des Haupttriebs betragen und die einen Astabgangswinkel von unter  $25^\circ$  aufweisen. Für jede Buche wurde die Anzahl solcher Steiläste dokumentiert. Eine noch intensivere Konkurrenz zwischen Haupt- und Seitentrieb führt zur sogenannten Zwieselbildung. Als *Zwiesel* werden demnach Seitentriebe verstanden, deren Durchmesser und Höhe mehr als 75 % der Hauptachse erreichen (KÜSTER 2000; HAGEMANN 2005). Die Höhenrelation dient dabei explizit als Maß der Konkurrenzstärke des Seitentriebs gegenüber der Hauptachse. Folglich werden die beschriebenen Verzweigungstypen als Indikatoren für die Schaft- und Kronenauflösung (Verlust der Monocormie) herangezogen (RICHTER 1990; LEDER & HILLEBRAND 2001). Neben der Zwieselanzahl wurde für jede Buche die Ansatzhöhe des tiefsten Zwiesels gemessen (vgl. MARVIE-MOHADJER 1975). Dadurch konnten *Tiefzwiesel* definiert werden, zu denen alle Buchen zählen, bei denen der erste Zwiesel unterhalb von 3,0 m ansetzt (Abbildung 29).

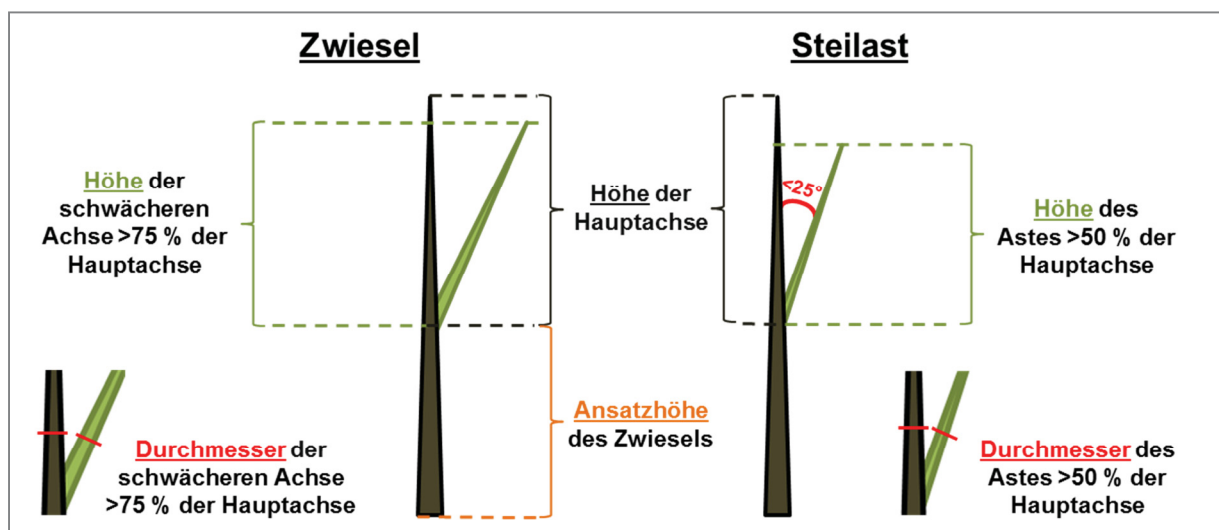

















Abbildung 29: Grafische Darstellung der Definition eines Steilasts (rechts) sowie eines Zwiesels (links).

Die Datenaufnahme erfolgte im Jahr 2012 nach Abschluss der Vegetationszeit. Berücksichtigt wurden dabei nur Zwiesel, die spätestens am Triebabschnitt des Jahres 2010 der Hauptachse entsprangen. Dadurch wurde gewährleistet, dass der Zwiesel bildende Ast mindestens zwei (regulärer Seitentrieb – 2011) bzw. drei (sytleptischer Seitentrieb – 2010) Jahre alt war (vgl. GRUBER 1998; MATYSSEK ET AL. 2010). Infolgedessen war von einer längerfristig anhaltenden Konkurrenzsituation zwischen dem betreffenden Seitentrieb und der Hauptachse auszugehen.

### 5.2.2 Gutachterliche Qualitätsansprache

Den Kern der Untersuchung bildete eine *qualitative Gesamteinschätzung* der Buchen. Der dazu verwendete Anspracheschlüssel hat sich in früheren Arbeiten an jungen Eichen bereits mehrfach bewährt (vgl. GOCKEL 1994; FISCHER 2000) und wurde in der hier eingesetzten Form zuletzt von LEONHARDT & WAGNER (2006) explizit für die Anwendung in Buchenvorانبauten modifiziert. Die Qualitätsbeurteilung erfolgte als gutachterliches, zweistufiges Verfahren. Dabei wurden Schaft- und Kronenform zunächst separat angesprochen und einer von drei bzw. fünf Kategorien zuordnet. Aus der Kombination beider Merkmale ergibt sich dann die Qualitätsklasse des Baums, welche vier Stufen von „sehr gut“ bis „unzureichend“ unterscheidet (Abbildung 30).

<b>Krone \ Schaft</b>	<b>wipfelschäftig</b>	<b>verzweigt, wipfelschäftig</b>	<b>steilastig, starkastig</b>	<b>gezwieselt</b>	<b>verbuscht, aufgelöst</b>	<b>Qualitätsklasse</b>
<b>gerade</b>						sehr gute Bäume
<b>bogig, knickig</b>						gute Bäume
<b>stark gekrümmt</b>						Zwiesel
						unzureichende Bäume

**Abbildung 30:** Anspracheschlüssel zur gutachterlichen Qualitätsbeurteilung von Schaft- und Kronenform der Buchen. Aus der Kombination beider separat angesprochenen Merkmale ergibt sich die Qualitätsklasse des Baums. Anspracheschlüssel nach LEONHARDT & WAGNER (2006) in Anlehnung an GOCKEL (1994) und FISCHER (2000). Abbildung in Anlehnung an HERTRAMPF (2009).

Die Qualitätseinschätzung geschah zwar gutachterlich und folglich ohne Erhebung metrischer Daten, dennoch lagen Orientierungswerte zur Abgrenzung der Schaft- und Kronenformkategorien vor. Dadurch wird eine objektive und vor allem reproduzierbare



Vorgehensweise sichergestellt. Die Güte der Stammform bemisst sich an der Krümmungsstärke, beurteilt am Abweichungswinkel von der Vertikalen. Ausschlaggebend für die Einstufung der Kronenform ist der Grad der Apikaldominanz des Terminaltriebs. Diese wurde wiederum anhand der Durchmesser- und Höhenrelation von Haupt- und Seitentrieben bewertet. Bäume mit deutlicher Apikaldominanz lassen keine konkurrierenden Seitentriebe zu und bilden dadurch die qualitativ angestrebte wipfelschäftige (monocorme) Form aus. Dagegen zeigt die Präsenz mehrerer konkurrenzstarker Seitenachsen eine frühzeitige Schaftauflösung und folglich unzureichende Qualitäten an (Tabelle 17).

**Tabelle 17:** Kategorien der Schaft- und Kronenform sowie deren Grenzwerte bei der gutachterlichen Qualitätsansprache der Buchen. Nach LEONHARDT (2006).

	Kategorie	Kriterien und Grenzwerte
Schaft	(1) gerade	Abweichungen von der Lotrechten < 22,5°
	(2) bogig, knickig	Abweichungen von der Lotrechten 22,5–45°
	(3) stark gekrümmt	Abweichungen von der Lotrechten > 45°
Krone	(1) wipfelschäftig	kein konkurrierender Seitentrieb
	(2) verzweigt, wipfelschäftig	Seitentrieb < 50 % der Höhe und des Durchmessers der Hauptachse
	(3) steilastig, starkastig	Seitentrieb > 50 % der Höhe und des Durchmessers der Hauptachse
	(4) ein- oder mehrfach gezwieselt	Seitentrieb > 75 % der Höhe und des Durchmessers der Hauptachse
	(5) verbuscht, aufgelöst	mehrere Seitenachsen > 50 % des Durchmessers der Hauptachse
➔ <b>Kombination von Schaft- und Kronenform zu einer Qualitätsklasse</b> (Abbildung 30)		

Auf Basis dieser Qualitätsklassen und unter gleichzeitiger Berücksichtigung der soziologischen Stellung der Einzelbäume innerhalb des Probekreiskollektivs erfolgte die Definition von *Z-Baum-Anwärtern*. Darunter werden Buchen verstanden, die mit der Qualitätsklasse I „sehr gut“ bewertet wurden und zugleich 80 % oder mehr der Maximalbaumhöhe im jeweiligen Probekreis erreichten. Es wird hier ganz bewusst der Begriff *Z-Baum-Anwärter* verwendet, da die langfristige Qualitätsentwicklung der jungen Buchen in der gegenwärtigen Qualifizierungsphase noch nicht sicher eingeschätzt werden kann, sodass die Auswahl von Zukunftsbäumen mit erheblichen Unsicherheiten behaftet ist (LEIBUNDGUT 1978; SCHÖBER 1990; RÖHRIG ET AL. 2006).

## 5.3 Statistische Auswertung

### 5.3.1 Analyse von Zähl- und Proportionaldaten

Zur Modellierung der Steilast- und Zwieselbildung sowie der Anzahl von Z-Baum-Anwärtern pro Hektar in Abhängigkeit von sturmbedingter Freistellung, Pflanzendichte sowie Entwicklungsstadium des Voranbaus wurden generalisierte lineare gemischte Modelle

(GLMM) nach der in Kapitel 2.4.4 (S. 47) erläuterten Prozedur genutzt (vgl. BOLKER ET AL. 2008; ZUUR ET AL. 2009). GLMM ermöglichen die Analyse nicht normalverteilter Daten bei gleichzeitiger Berücksichtigung mehrfach geschachtelter Versuchsanlagen mit korrelierten Messwertfehlern (BOLKER ET AL. 2008; ZUUR ET AL. 2009; THIELE & MARKUSSEN 2012). In der vorliegenden Arbeit wurde die spezielle Form des glmmPQL gewählt. PQL steht dabei für die Methode der Parameterschätzung „Penalized Quasi-Likelihood“. Dieses Verfahren integriert feste sowie zufällige Effekte in die Modellkonstruktion und nutzt spezifische Korrelationsstrukturen, um korrelierte Messwertfehler zwischen den Probanden einer Gruppe zu korrigieren. Vor allem aber wird eine Over- bzw. Underdispersion in glmmPQL gegebenenfalls explizit beachtet (VENABLES & RIPLEY 2002; ZUUR ET AL. 2009).

Die Modellbildung beginnt mit der Auswahl einer der vorliegenden Response-Variable entsprechenden Verteilungsart mit zugehöriger Linkfunktion. Die Zählraten wurden stets auf der Basis des plotspezifischen Medians ausgewertet (Steilast- und Zwieselzahl, Anzahl Z-Baum-Anwärter pro Hektar). Dabei wurde die Poisson-Verteilung zugrunde gelegt, welche eine Logarithmusfunktion als Link verwendet („log link“). Die Analyse der Proportionaldaten basiert auf der Binomialverteilung und arbeitet mit der Logit-Linkfunktion. Diese wurde zur Modellierung der relativen Häufigkeit von Tiefzwieseln eingesetzt. Daraus resultiert folgende allgemeine Modellgleichung (16):

$$\text{link}(Y_{ijklmno}) = (\beta_0) \text{ Intercept} + (\beta_{1,i}) \text{ Schirm} + (\beta_2) \text{ Pflanzenzahl} + (\beta_{3,j}) \text{ Stadium} + \\ (b_{4,k}) \text{ Region} + (b_{5,l}) \text{ Forstbetrieb} + (b_{6,m}) \text{ Revier} + (b_{7,n}) \text{ Fläche} + \varepsilon_{ijklmno} \quad (16)$$

Die Response-Variable  $Y$  steht für die jeweiligen Qualitätsmerkmale, welche durch eine lineare Beziehung aus  $(\beta_0)$  Intercept, den Faktoren  $(\beta_{1,i})$  Schirm (zwei Stufen: Freistellung vs. unter Schirm) und  $(\beta_{3,j})$  Entwicklungsstadium (zwei Stufen: vor vs. nach Dickungsschluss) sowie der  $(\beta_2)$  Pflanzenzahl als Kovariate beschrieben werden („fixed effects“). Weiterhin wird die hierarchisch geschachtelte Versuchsanlage im Zufallsterm  $(b_{4,k} - b_{7,n})$  implementiert („random effects“). Das  $\varepsilon$  beinhaltet die Reststreuung. Die Indizes stehen für die verschiedenen Faktorstufen der festen  $(i - j)$  bzw. der zufälligen Effekte  $(k - n)$  sowie die Einzelwerte auf Plotebene  $(o)$ . Traten zusätzlich zu den in Formel (16) dargestellten Einzeleffekten Wechselwirkungen zwischen den erklärenden Variablen auf, wurden diese ebenfalls in der Modellkonstruktion bedacht. Bezüglich der Interpretation der Schätzparameter ist zu bedenken, dass diese der jeweiligen Linkfunktion entsprechend transformiert vorliegen.

### 5.3.2 Analyse der Qualitätsklassenverteilung

Bei der qualitativen Gesamteinschätzung wurde jeder Buche eine von vier möglichen Qualitätsklassen zugewiesen. Die Response-Variable ( $y_j$ ) ist also durch  $j = 4$  Merkmalsausprägungen charakterisiert, welche außerdem eine feste Rangordnung besitzen (Qualität „sehr gut“ besser als „gut“ etc.). Demnach liegen ordinal-multinomiale Daten vor (vgl. VENABLES & RIPLEY 2002; FARAWAY 2006). Zur Modellierung der Qualität in Abhängigkeit von den Untersuchungsfaktoren wurde auf ein erweitertes logistisches Regressionsmodell, das Proportional Odds Logistic Regression Model (POLR), in der bei FARAWAY (2006) beschriebenen Vorgehensweise zurückgegriffen (vgl. Kapitel 2.4.5, S. 50). Dabei werden die Response-Kategorien gemäß ihrer Rangordnung in dichotome Vergleichsgruppen zerlegt. Im Modell werden dann alle möglichen Paarvergleiche zwischen niedrigeren und höheren Kategorien vollzogen ( $y_j > j$  vs.  $y_j \leq j$ ). Für die Qualitätsklassen ergeben sich insgesamt drei Vergleichsgruppen ( $j - 1$ ) (vgl. MOUTINHO & HUTCHESON 2011):

- Vergleichsgruppe 1: sehr gut vs. gut, zwieselig, unzureichend
- Vergleichsgruppe 2: sehr gut, gut vs. zwieselig, unzureichend
- Vergleichsgruppe 3: sehr gut, gut, zwieselig vs. unzureichend

Das POLR verwendet für alle Vergleichsgruppen dieselben Regressionskoeffizienten, da von einem stets identischen Effekt der Modellparameter auf die Response-Variablen ausgegangen wird (AGRESTI 2002; CHRISTENSEN 2013). Diese Hypothese wurde zuvor geprüft, indem die Streuung des POLR mit der eines multinomialen Logit-Modells (ohne Berücksichtigung der Rangordnung der Response-Kategorien) verglichen wurde. Im vorliegenden Fall ist die Annahme gerechtfertigt. Jedes Modell umfasst zudem  $j - 1$  Intercepts. Diese geben als „Cutpoints“ die Übergänge zwischen den  $j$  Kategorien an (IDRE 2015). POLR nutzt die Logit-Linkfunktion und ermittelt einen Parameter, welcher Ausdruck der Wahrscheinlichkeit ist, dass die Qualität eine höhere anstelle einer geringeren Kategorie annimmt, wenn sich die erklärenden Variablen um eine Einheit ändern (MOUTINHO & HUTCHESON 2011). Die Modellgleichung hat folgende Form (17):

$$\text{logit} [\text{Pr}(y > j)]_m = (\beta_0) \text{Intercept} + (\beta_{1,m}) \text{Schirm} + (\beta_2) \text{Pflanzenzahl} \quad (17)$$

Dabei ist  $\text{Pr}(y)$  die Wahrscheinlichkeit einer Qualitätsklasse  $y_j > j$ , während  $\beta_{0-2}$  die Modellparameter angibt. Der Index  $m$  beschreibt die beiden Faktorstufen des Schirms. Die Pflanzenzahl pro Hektar geht als Kovariate ein. Das Entwicklungsstadium der Voranbauten

leistet offensichtlich keinen bedeutenden Beitrag zur Erklärung der Qualitätsklasse und wurde deshalb im Zuge der automatischen stepAIC-Parameterselektion aus dem Modell eliminiert (vgl. VENABLES & RIPLEY 2002).

### 5.3.3 Metrische Charakterisierung der Qualitätsklassen

In einem nächsten Schritt wurde die gutachterliche Qualitätsansprache durch metrische Größen untermauert. Auf der Grundlage der gemessenen Qualitätsparameter sollten die einzelnen Klassen präzise charakterisiert und differenziert werden. Dadurch sollte zugleich dargestellt werden, wie eine typische Buche in der jeweiligen Qualitätsklasse hinsichtlich Astigkeit und Verzweigungsmorphologie beschaffen ist. Im Umkehrschluss ermöglicht diese Analyse aber auch Aussagen darüber, wie stark der Effekt einzelner Merkmale auf die Gesamtqualität der vorangebauten Buchen ist. Da in dieser Arbeit jedoch keine metrische Quantifizierung der Stammform (Krümmungsstärke) vorgenommen wurde, musste die Prozedur ausschließlich auf der Basis von Kronenmerkmalen umgesetzt werden. Unter Einbeziehung der zur gutachterlichen Einschätzung herangezogenen Eigenschaften (Tabelle 17) wurden drei Merkmalsgruppen gebildet, die zur metrischen Charakterisierung der Kronenform geeignet erschienen. Diese Gruppen sind zumeist durch mehrere Variablen belegt:

- *Astdimension*: Durchmesser stärkster Grünast [cm], ASIX stärkster Grünast [%] (vgl. Tabelle 14, S. 89)
- *Astwinkel*: mittlerer Grünastwinkel [°] (vgl. Tabelle 14, S. 89)
- *Verzweigungsform*: Steilastzahl [n pro Buche], Zwieselzahl [n pro Buche], Ansatzhöhe erster Zwiesel [m], Tiefzwieselanteil [% des Kollektivs]

Aus jeder dieser drei Gruppen sollte jeweils nur ein Parameter in das Modell einfließen, und zwar der mit dem höchsten Erklärungsbeitrag. Aus diesem Grund basierte die Auswahl auf einer Korrelationsanalyse (Kriterium: größter Korrelationskoeffizient). Dadurch wurde ebenfalls geprüft, inwiefern die erklärenden Parameter miteinander korrelieren. Dieser Aspekt ist namentlich vor dem Hintergrund der Kollinearität zu beachten, da regressionsanalytische Modelle die Unabhängigkeit der Prädiktoren voraussetzen (vgl. HEDDERICH & SACHS 2012). Übersteigt der Korrelationskoeffizient den Grenzwert von 0,7, liegt Kollinearität vor, was wiederum zu Problemen bei der Parameterschätzung sowie der Bestimmung tatsächlich relevanter Prädiktoren im statistischen Modell führt (DORMANN ET AL. 2013). In diesem Fall wurde einer der beiden hoch korrelierten Prädiktoren eliminiert.

Eine solche Kollinearität konnte zwischen der Ansatzhöhe des ersten Zwiesels und dem Anteil tief gezwieselter Buchen ( $r\text{-PEARSON} = -0,755^{***}$ ) nachgewiesen werden. Weiterhin bestand zwischen dem Durchmesser des stärksten Grünasts und der Zwieselzahl einer Buche eine sehr hohe Korrelation ( $r\text{-PEARSON} = 0,712^{***}$ ). Da die Zwieselzahl innerhalb der Merkmalsgruppe „Verzweigungsform“ jedoch mit Abstand am stärksten zur Erklärung der Qualitätsklasse beiträgt ( $\text{SPEARMAN-rho} = 0,709^{***}$ ), wurde diese für das Modell ausgewählt. Der absolute Astdurchmesser wurde daraufhin verworfen, sodass die Merkmalsgruppe „Astdimension“ durch den relativen Astdurchmesser ASIX repräsentiert ist. Der Astwinkel bildet die dritte erklärende Größe. Zur Modellierung der Qualitätsklasse in Abhängigkeit von diesen Prädiktoren wurde wiederum ein Proportional Odds Logistic Regression Model (POLR) konstruiert. Das Initialmodell wurde mithilfe der automatischen stepAIC-Funktion schrittweise verbessert. Daraus resultiert folgende Modellgleichung (18):

$$\text{logit} [\Pr(y > j)]_m = (\beta_0) \text{Intercept} + (\beta_1) \text{ASIX} + (\beta_2) \text{Astwinkel} \times (\beta_3) \text{Zwieselzahl} \quad (18)$$

$\Pr(y)$  beschreibt die Wahrscheinlichkeit einer Qualitätsklasse  $y_j > j$ , während  $\beta_{0-3}$  die Modellparameter angibt. Alle erklärenden Größen gehen als Kovariaten in das Modell ein. Zwischen  $(\beta_2)$  Astwinkel und  $(\beta_3)$  Zwieselzahl der Buchen besteht zudem eine Wechselwirkung.

## 5.4 Ergebnisse

### 5.4.1 Steiläste und Zwiesel

An den Buchen waren insgesamt sehr geringe *Steilastzahlen* festzustellen, welche jedoch infolge des Schirmverlusts signifikant anstiegen (Tabelle 18). Bei mittleren Pflanzendichten von 6.000 St./ha wies nur jede neunte Buche unter Fichtenschirm im Stadium vor Dickungsschluss überhaupt einen Steilast auf (Modellwert: 0,11 n/Baum). Auf den Sturmflächen wurde ein solcher sechs Jahre nach KYRILL bereits an zwei von drei Bäumen registriert (Modellwert: 0,67 n/Baum). Im Stadium nach Dickungsschluss konnte statistisch gesehen an jeder sechsten Buche unter Schirm (Modellwert: 0,17 n/Baum), jedoch an allen Buchen auf Freiflächen ein Steilast gefunden werden (Modellwert: 1,05 n/Baum). Die Wirkung des Schirmverlusts ist damit in beiden Entwicklungsstadien sehr ähnlich ausgeprägt, wobei die Voranbauten nach Dickungsschluss unabhängig von der Überschirmungssituation signifikant häufiger Steiläste ausbildeten. Mit zunehmender Pflanzendichte im Voranbau sinkt die Anzahl steiler Äste ( $\beta_2 = -0,17638$ ), aber nur unter Fichtenschirm ist auch ein signifikanter Effekt nachzuweisen [ $(\beta_2) - (\beta_1 \times \beta_2) = -0,9073$ ]. Dieser wird durch eine

asymptotisch gegen null laufende Logarithmusfunktion beschrieben, sodass unter Schirm ab Pflanzenzahlen von 6.500 St./ha vor bzw. 11.000 St./ha nach Dickungsschluss theoretisch keine Steiläste mehr vorkommen (Modellwert:  $< 0,10$  n/Baum). Dagegen weisen selbst in den dichtesten der untersuchten Voranbauten auf Sturmflächen nie weniger als zwei Drittel der Buchen einen Steilast auf. In der Gesamtbetrachtung ist der Schirmverlust somit die wesentliche erklärende Größe der Steilastbildung, während dem Entwicklungsstadium und vor allem der Bestandesdichte nur eine untergeordnete Bedeutung zukommt.

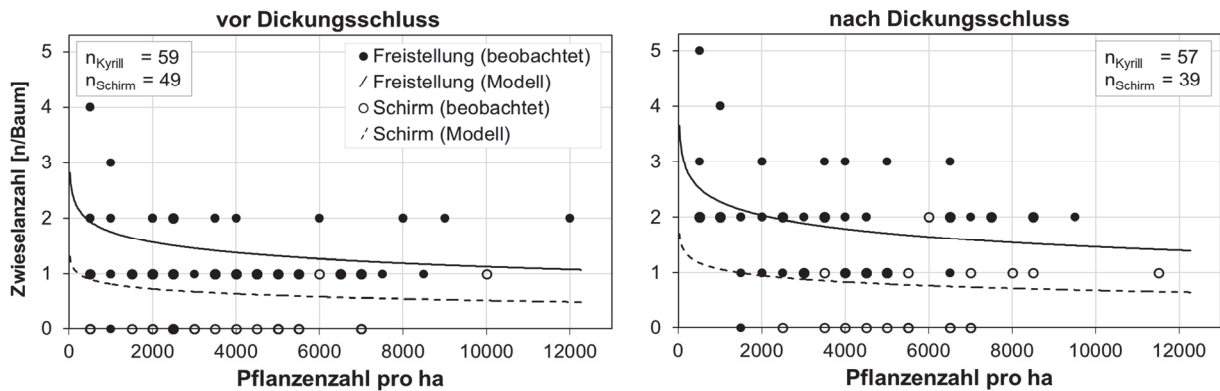
**Tabelle 18:** Ergebnisse der generalisierten linearen gemischten Modelle (GLMM) zur Schätzung der Steilast- und Zwieselmerkmale der Buchen in Abhängigkeit von Schirm, Pflanzenzahl und Entwicklungsstadium des Voranbaus. Das Intercept bezieht sich auf freigestellte Voranbauten vor Dickungsschluss.

feste Effekte		Modell-schätzung	Standard-fehler	p-Wert
Anzahl Steiläste [n/Baum]				
$\beta_0$	Intercept	1,13876	0,8908	0,2028
$\beta_1$	Schirm	4,55207	1,6215	<b>0,0056**</b>
$\beta_2$	ln (Pflanzenzahl pro Hektar)	-0,17638	0,1120	0,1171
$\beta_3$	Entwicklungsstadium	0,44675	0,1836	<b>0,0160*</b>
$\beta_1 \times \beta_2$	Schirm x ln (Pflanzenzahl pro Hektar)	-0,73092	0,2114	<b>0,0007***</b>
Anzahl Zwiesel [n/Buche]				
$\beta_0$	Intercept	1,81620	0,4542	<b>0,0001***</b>
$\beta_1$	Schirm	-0,76778	0,1085	<b>0,0000***</b>
$\beta_2$	ln (Pflanzenzahl pro Hektar)	-0,18154	0,0557	<b>0,0014**</b>
$\beta_3$	Entwicklungsstadium	0,25945	0,1236	<b>0,0372*</b>
Buchen mit Tiefzwiesel [% des Kollektivs]				
$\beta_0$	Intercept	0,48689	0,5854	0,4067
$\beta_1$	Schirm	-1,38745	0,2575	<b>0,0000***</b>
$\beta_2$	Pflanzenzahl pro Hektar	-0,00013	$< 0,0001$	<b>0,0325*</b>
$\beta_3$	Entwicklungsstadium	-0,02635	0,4446	0,9528
$\beta_2 \times \beta_3$	Pflanzenzahl $\times$ Entwicklungsstadium	-0,00025	0,0001	<b>0,0204*</b>

Noch deutlicher wird der qualitätsmindernde Effekt eines plötzlichen Schirmverlusts anhand der *Zwieselzahl einer Buche*. Dabei fällt zunächst auf, dass freigestellte Voranbauten unabhängig von Pflanzendichte und Entwicklungsstadium mehr als doppelt so häufig Zwiesel ausbilden wie überschirmte Bestände (Abbildung 31). Buchen ohne Zwiesel wurden nahezu ausschließlich unter Fichtenschirm gefunden. Ausgehend von der Annahme einer mittleren Stammzahl von 6.000 St./ha errechnet das logistische Regressionsmodell theoretische Zwieselzahlen von 1,27 n/Baum bzw. 0,59 n/Baum bezogen auf das Stadium vor Dickungsschluss. Auch nach Dickungsschluss ist diese Differenzierung zu erkennen, wobei die absoluten Werte mit 1,64 n/Baum bzw. 0,76 n/Baum signifikant höher sind als in den jüngeren Voranbauten. Mit steigender Pflanzenzahl pro Hektar im Voranbau gehen die Zwieselzahlen signifikant zurück. Die dichteabhängige Differenzierung geht in beiden

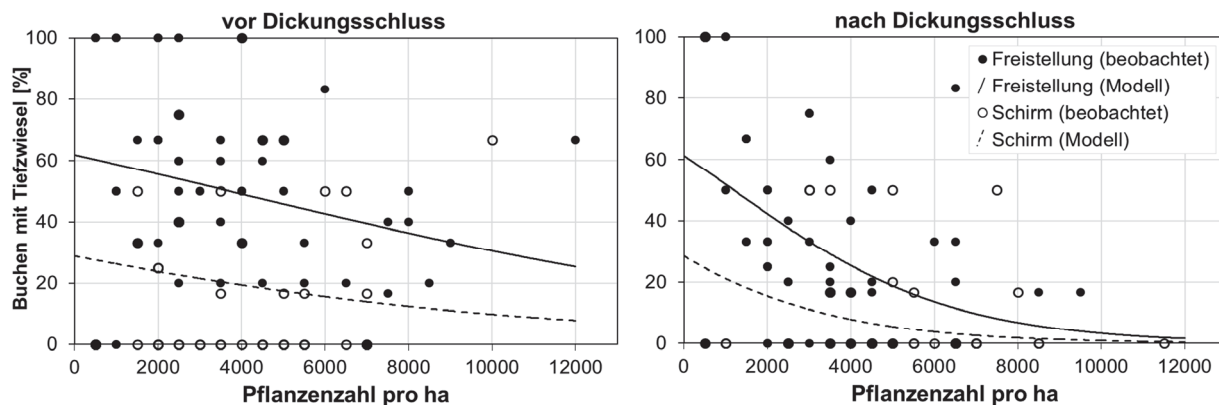


Schirmvarianten sowie Entwicklungsstadien gleichermaßen vonstatten. Vor allem im niedrigen Stammzahlbereich wirkt sich eine Erhöhung der Pflanzenzahl im Voranbau zunächst sehr deutlich auf die Zwieselbildung aus, jedoch lässt dieser Effekt stetig nach. Demzufolge ist statistisch gesehen selbst bei höchster Bestandesdichte an jeder der Buchen auf Sturmflächen mindestens ein Zwiesel zu finden. Von den untersuchten Faktoren ist der Schirmverlust demzufolge der mit der stärksten Wirkung auf die Zwieselbildung (Tabelle 18).



**Abbildung 31:** Anzahl der pro Buche gebildeten Zwiesel in Abhängigkeit von der Pflanzenzahl pro Hektar, getrennt nach Entwicklungsstadium und Überschirmung.

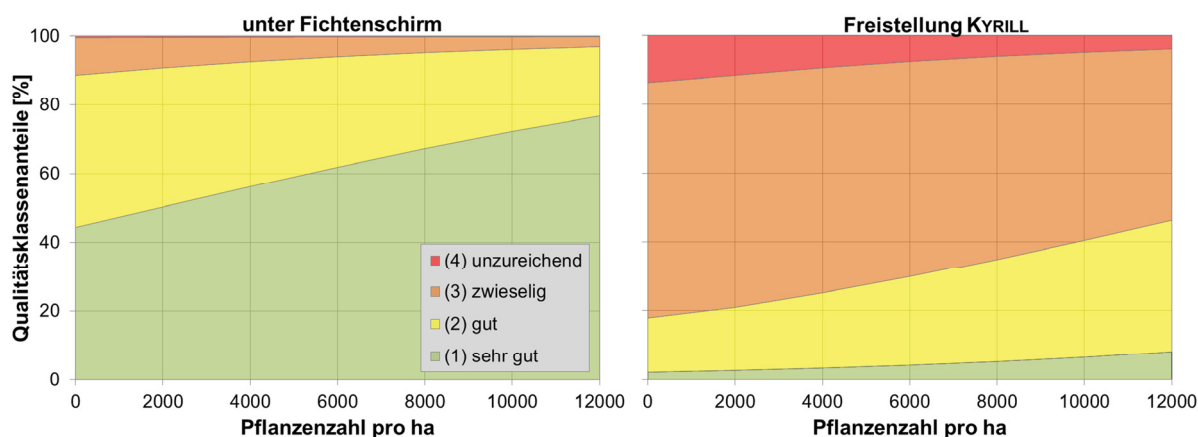
Der relative Anteil der Buchen, welche den *Tiefzwieseln* zuzuordnen sind, zeigt ebenfalls eine höchst signifikante Abhängigkeit von der Überschirmung (Abbildung 32). Namentlich im Stadium vor Dickungsschluss stieg der Prozentsatz solcher Bäume innerhalb von sechs Jahren nach der Freistellung auf das Doppelte bis Dreifache an. So kommen Tiefzwiesel bei Bestandesdichten von 6.000 St./ha unter Fichtenschirm zu 16 % vor, auf den Sturmflächen dagegen zu 43 %. Deutlich differenzierter stellt sich die Situation im Stadium nach Dickungsschluss dar. Derart hohe Tiefzwieselanteile, wie sie vor Dickungsschluss zu beobachten waren, sind hier nur in äußerst stammzahlarmen Voranbauten anzutreffen. Vor allem aber sinkt die Zwieselhäufigkeit mit zunehmender Pflanzendichte rapide ab. Demzufolge treten selbst in den freigestellten Voranbauten im Stadium nach Dickungsschluss kaum Tiefzwiesel auf, sofern die Bestandesdichte 9.000 St./ha nicht unterschreitet. Der Schirmverlust hat unter diesen Bedingungen keine bedeutsamen Konsequenzen, wie der Vergleich mit den Referenzflächen unter Fichtenschirm offenbart. Doch auch im Stadium vor Dickungsschluss geht der Tiefzwieselanteil unabhängig von der Überschirmung mit steigender Bestandesdichte zurück. In den dichtesten Voranbauten mit 12.000 St./ha treten dadurch auf den Freiflächen noch zu 25 % Tiefzwiesel auf, unter Fichtenschirm noch etwa bei 8 % aller Buchen. Die signifikante Wechselwirkung von Pflanzenzahl und Entwicklungsstadium im Modell bestätigt diesbezüglich, dass dieser Prozess nach Dickungsschluss wesentlich stärker ausgeprägt ist  $[(\beta_2) - (\beta_2 \times \beta_3) = -0,00038]$  als vor Dickungsschluss ( $\beta_2 = -0,00013$ ).



**Abbildung 32:** Relativer Anteil der Buchen mit einem Tiefzwiesel (Ansatzhöhe: < 3,0 m) in Abhängigkeit von der Pflanzendichte pro Hektar, getrennt nach Entwicklungsstadium und Überschirmung.

## 5.4.2 Qualitätsklassen

Die Ergebnisse der gutachterlichen Qualitätsbeurteilung (vgl. LEONHARDT & WAGNER 2006) betonen die gravierenden Konsequenzen eines plötzlichen sturmbedingten Schirmverlusts auf die Qualitätsentwicklung junger Buchen (Abbildung 33). Die Freistellung äußert sich innerhalb von nur sechs Vegetationsperioden in einem deutlich erhöhten Auftreten zwieseliger und unzureichender Qualitäten auf den Sturmflächen. Bei mittleren Pflanzendichten im Voranbau von 6.000 St./ha treten unter Fichtenschirm zu 61,9 % sehr gute und zu 32,2 % gute Buchen auf, sodass die schlechten Ausprägungen weniger als 6 % ausmachen. Im Gegensatz dazu kommen in den freigestellten Voranbauten gerade einmal zu 4,2 % sehr gute sowie zu 25,6 % gute Bäume vor, während hier die zwieseligen Individuen mit 67,5 % das Kollektiv klar dominieren. Weiterhin treten zu 7,5 % unzureichende Qualitäten auf, welche unter Schirm nahezu gänzlich fehlen.



**Abbildung 33:** Modellvorhersage für die relativen Anteile der vier Qualitätsklassen in Abhängigkeit von der Pflanzendichte pro Hektar des Voranbaus. Die Darstellung erfolgt separat für Voranbauten unter Fichtenschirm (links) sowie auf Freiflächen (rechts). Die Ergebnisse gelten unabhängig vom Entwicklungsstadium der Voranbauten.

Übereinstimmend bestätigt auch das statistische Modell, dass der Verlust des Fichtenschirms der einzige signifikant wirkende Faktor für die Erklärung der Qualitätsklassenverteilung ist (Tabelle 19). Dem Schirm wird dabei im Modell eine Odds Ratio von 0,02692 zugewiesen. Das bedeutet, dass die Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer höheren und somit schlechteren Qualitätsklasse unter Fichtenschirm weitaus geringer ist als auf der Freifläche. Mit zunehmender Pflanzenzahl pro Hektar im Voranbau ist zudem eine Verschiebung der Qualitätsklassenverteilung zugunsten besserer Formen erkennbar. In den stammzahlreichsten Voranbauten mit 12.000 St/ha beträgt der Anteil sehr guter Bäume unter Fichtenschirm 76,7 %. Auf den Sturmflächen treten sehr gute und gute Formen zu 8,2 % bzw. 38,2 % auf. Dennoch dominieren hier die Zwiesel mit 49,8 % aller untersuchten Individuen nach wie vor das Bestandesbild. Trotz dieser Tendenzen konnte im Modell kein signifikanter Effekt der Pflanzenzahl auf die Qualitätsklassenverteilung nachgewiesen werden. Die Odds Ratio mit einem Wert nahe eins belegt dies sehr deutlich (Tabelle 19).

**Tabelle 19:** Ergebnisse der Proportional Odds Logistic Regression (POLR) zur Schätzung der relativen Anteile der vier Qualitätsklassen in Abhängigkeit von Schirm und Pflanzenzahl pro Hektar des Voranbaus. Die Intercepts sind als „Cutpoints“ zwischen den Qualitätsklassen zu verstehen. Die Odds Ratio gibt die Relation der Wahrscheinlichkeiten an, dass eine höhere statt einer geringeren Qualitätsklasse erreicht wird, wenn sich der erklärende Parameter um eine Einheit erhöht. Die Intercepts beziehen sich auf freigestellte Voranbauten.

Modellparameter	Schätzwert (Log Odds)	Standardfehler	Odds Ratio	p-Wert
Intercept 1 2	-7,45629	0,0845		0,0000***
$\beta_0$ Intercept 2 3	-5,18124	0,2609		0,0000***
Intercept 3 4	-1,81464	0,3838		0,0000***
$\beta_1$ Schirm	-3,61504	0,1923	0,02692	0,0000***
$\beta_2$ Pflanzenzahl pro Hektar	-0,00012	0,0001	0,99988	0,3447

### 5.4.3 Charakterisierung der Qualitätsklassen

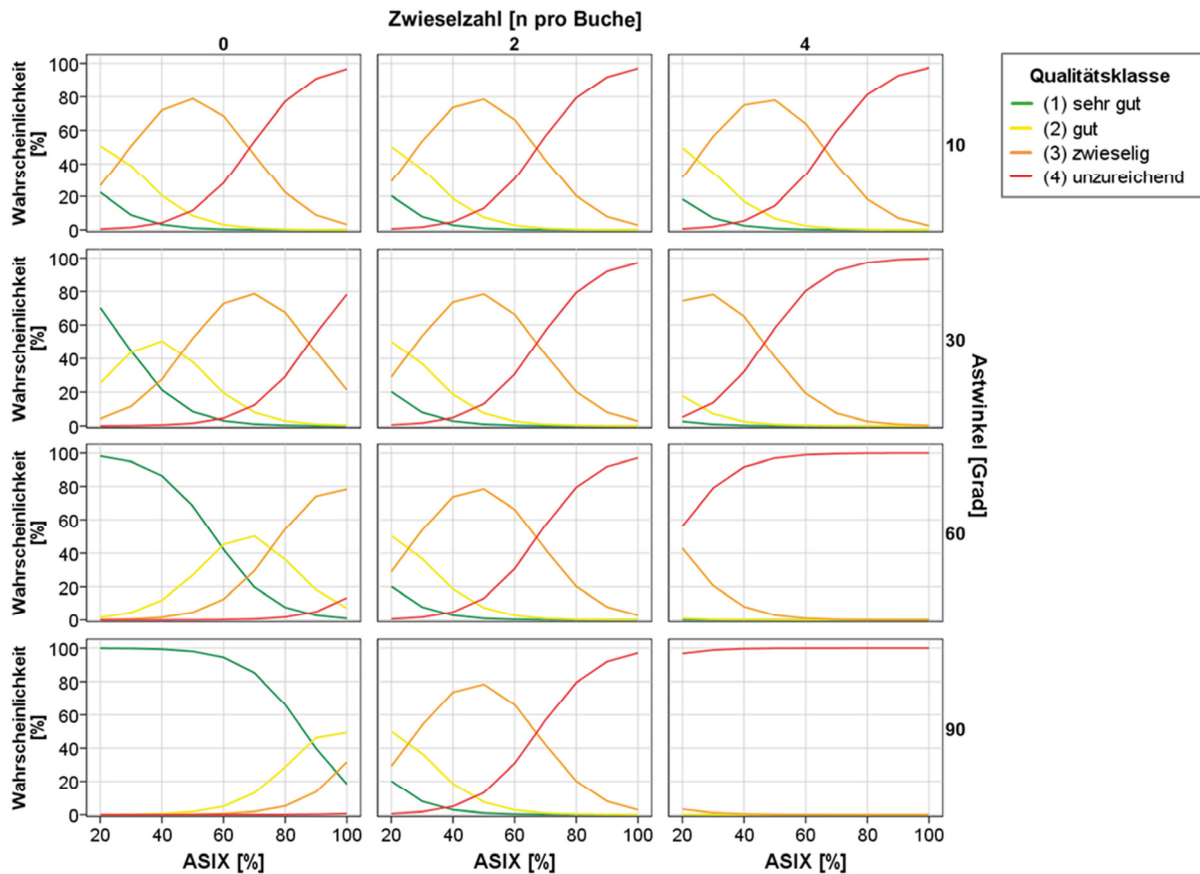
Zur metrischen Charakterisierung der gutachterlich erhobenen Qualitätsklassen wurden die ebenfalls an den betreffenden Bäumen erfassten Gütemerkmale ASIX, mittlerer Astwinkel und Zwieselzahl (Median) eingesetzt. Das daraus entwickelte POLR-Modell weist höchst signifikante Einzeleffekte für ASIX sowie Astwinkel aus. Gemäß der zugehörigen Odds Ratios findet mit steigendem ASIX grundsätzlich eine Verschiebung zugunsten höherer und somit schlechterer Qualitätsklassen statt. Für den Astwinkel wurde eine inverse Wirkungsweise festgestellt. Unter der Voraussetzung, dass die Buchen keine Zwiesel aufweisen, geht die prozentuale Häufigkeit schlechter Qualitäten mit zunehmendem Astwinkel merklich zurück. Ergänzend bestätigt die hoch signifikante Wechselwirkung von Astwinkel und Zwieselzahl einer Buche aber auch, dass große Astwinkel mit steigender Zwieselzahl einer Buche zunehmend negativ auf die Qualität wirken (additiver Effekt). Das heißt, die

Wahrscheinlichkeit höherer und somit schlechterer Qualitätsklassen ist umso größer, je höher Zwieselzahl und Astwinkel zugleich sind (Tabelle 20).

**Tabelle 20:** Ergebnisse der Proportional Odds Logistic Regression (POLR) zur Schätzung der Wahrscheinlichkeitsverteilung der vier Qualitätsklassen in Abhängigkeit von relativem Astdurchmesser (ASIX), mittlerem Astwinkel und Zwieselzahl (Median) einer Buche. Die Intercepts sind als „Cutpoints“ zwischen den Qualitätsklassen zu verstehen. Die Odds Ratio gibt die Relation der Wahrscheinlichkeiten an, dass eine Buche eine höhere statt einer geringeren Qualitätsklasse erreicht, wenn sich der erklärende Parameter um eine Einheit erhöht. Die Intercepts beziehen sich auf freigestellte Voranbauten.

	Modellparameter	Schätzwert (Log Odds)	Standard- fehler	Odds Ratio	p-Wert
$\beta_0$	Intercept 1 2	-0,12786	1,7413		0,9415
	Intercept 2 3	2,11139	1,7289		0,2220
	Intercept 3 4	6,38815	1,8877		<b>0,0007***</b>
$\beta_1$	ASIX	0,10827	0,0221	1,11435	<b>0,0000***</b>
$\beta_2$	Astwinkel	-0,10512	0,0280	0,90022	<b>0,0000***</b>
$\beta_3$	Zwieselzahl	-0,46421	0,9836	0,62863	0,6370
$\beta_2 \times \beta_3$	Astwinkel x Zwieselzahl	0,05262	0,0199	1,05403	<b>0,0083**</b>

Die durch das POLR-Modell vorhergesagte Wahrscheinlichkeitsverteilung wird in Abbildung 34 exemplarisch anhand repräsentativer Parameterkombinationen dargestellt. Deutlich zu erkennen ist eine zunehmende Häufigkeit schlechterer Formen mit steigendem ASIX. Namentlich die unzureichenden Qualitäten (Qualitätsklasse 4) werden durch einen Anstieg des relativen Astdurchmessers begünstigt. Bei den Buchen ohne Zwiesel ist mit zunehmendem Astwinkel eine merkliche Steigerung des Anteils guter und vor allem sehr guter Bäume (Qualitätsklassen 1 und 2) zu verzeichnen. Generell erreichen Buchen ohne Zwiesel, mit Astwinkeln von 90° und ASIX-Werten unter 60 % die besten Qualitäten. Solche Bäume werden nahezu ausnahmslos der Qualitätsklasse 1 „sehr gut“ zugeordnet. Ein- und zweifach gezwieselte Buchen fallen erwartungsgemäß vor allem in die Kategorie 3 „zwieselig“, wobei der Astwinkel hierbei zunächst irrelevant ist. Haben die Buchen mehr als zwei Zwiesel (Kronenauflösung), dominiert die Qualitätsklasse 4 „unzureichend“, was sich mit zunehmendem Astwinkel verstärkt. Demzufolge werden Bäume mit wiederholter Zwieselung und einem Astwinkel von 60° oder mehr fast ausschließlich der Qualitätsklasse 4 zugeordnet. Die letztgenannte Merkmalskonstellation stellt somit aus qualitativer Sicht die ungünstigste Kombination dar.



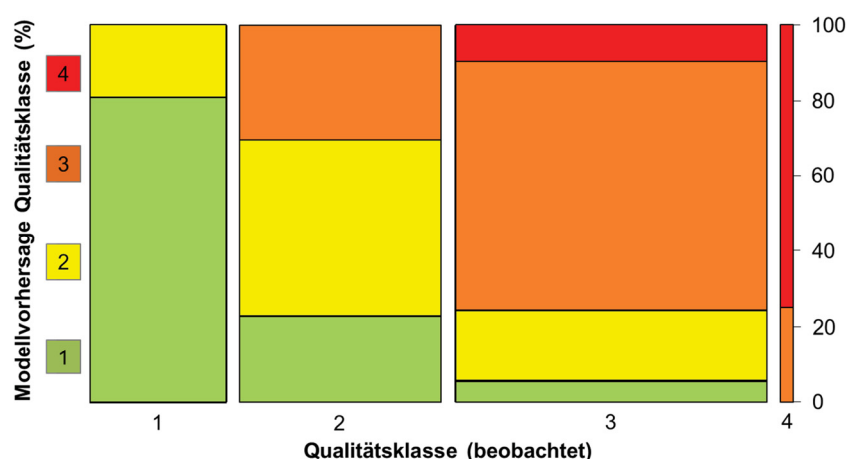
**Abbildung 34:** Modellvorhersage zur Wahrscheinlichkeitsverteilung der vier Qualitätsklassen in Abhängigkeit von ASIX, Zwieselzahl pro Buche (Spalten) und Astwinkel (Zeilen).

Auf der Basis dieses Modells sind auch Aussagen zur Merkmalsausprägung einer typischen Buche für jede der vier Qualitätsklassen möglich. Zu diesem Zweck wurden die arithmetischen Mittelwerte der erklärenden Größen unter Bedingungen von sehr hoher Eintrittswahrscheinlichkeit (möglichst  $\geq 80\%$ ) der jeweiligen Qualitätsklasse ermittelt (Tabelle 21). Buchen, welche der Qualitätsklasse 1 zugeordnet wurden, zeichnen sich durch die geringsten mittleren ASIX-Werte von 34,4 % sowie die größten Astwinkel von 74,8° aus und besitzen keine Zwiesel. Diese Buchen sind also feinastig, wipfelschäftig und haben nahezu horizontal ausgerichtete Äste. Bei der angegebenen Merkmalskombination ist mit einer Wahrscheinlichkeit von über 90 % von einem Baum der Qualitätsklasse 1 auszugehen. Buchen der Qualitätsklasse 2 kommen in keiner der vorliegenden Merkmalskombinationen mit einer relativen Häufigkeit über 50 % vor. Auffällig sind hier vor allem die deutlich kleineren Astwinkel im Vergleich zur Qualitätsklasse 1. Laut dem Modell besitzen diese Buchen zudem einen Zwiesel. Buchen der Klasse 3 zeichnen sich durch die geringsten und somit steilsten Astwinkel von durchschnittlich 37,8° sowie eine meist zweifache Zwieselung aus. Die Qualitätsklasse 4 ist durch den größten mittleren ASIX von 81,2 % und durchschnittlich drei Zwiesel pro Baum gekennzeichnet (Kronenauflösung).

**Tabelle 21:** Metrische Charakterisierung einer für jeweils eine der vier Qualitätsklassen repräsentativen Buche anhand des POLR-Modells aus ASIX, Astwinkel und Zwieselzahl (Tabelle 20). Angegeben sind der arithmetische Mittelwert der erklärenden Größen sowie die zugehörige Standardabweichung (SD) innerhalb der Klassen. Zudem ist die Eintrittswahrscheinlichkeit jeder Qualitätsklasse bei der zugrunde gelegten Merkmalskombination angegeben.

Qualitätsklasse		ASIX [%]	Astwinkel [°]	Zwieselzahl [n/Buche]	Eintrittswahrscheinlichkeit [%]
(1) sehr gut	Mittelwert	34,4	74,8	0	93,59
	SD	15,0	14,8	0,4	
(2) gut	Mittelwert	40,0	45,4	1	48,97
	SD	23,4	30,4	1,2	
(3) zwieselig	Mittelwert	51,5	37,8	2	78,18
	SD	18,4	27,1	1,3	
(4) unzureichend	Mittelwert	81,2	51,4	3	96,88
	SD	20,4	28,9	1,1	

Von Interesse ist schlussendlich die Frage, in welchem Ausmaß die im Rahmen des Modells anhand von ASIX, Astwinkel und Zwieselpräsenz vorhergesagte Qualitätsklasse mit der im Zuge der gutachterlichen Qualitätsansprache zugewiesenen Qualitätsklasse der Buchen übereinstimmt (Abbildung 35). Insgesamt wurde eine sehr hohe Korrelation zwischen Modellschätzung und Beobachtung festgestellt (SPEARMAN-rho = 0,714\*\*\*). Gleichzeitig bestehen erhebliche Unterschiede zwischen den einzelnen Klassen. Für die Qualitätsklassen 1 und 4 wurde eine sehr hohe Übereinstimmung von 82 % bzw. 74 % nachgewiesen. Auf die Qualitätsklasse 2 trifft die Modellschätzung dagegen nur in 46 % der Fälle zu. Abweichungen sind gleichermaßen sowohl in Richtung besserer als auch um eine Stufe schlechterer Baumtypen erkennbar. Die Qualitätsklasse 3 wird in 66 % der Fälle durch das Modell korrekt prognostiziert. Abweichungen treten vor allem zugunsten besserer Qualitäten auf. Das Modell neigt hier also offenbar zu einer Überschätzung der Qualität.

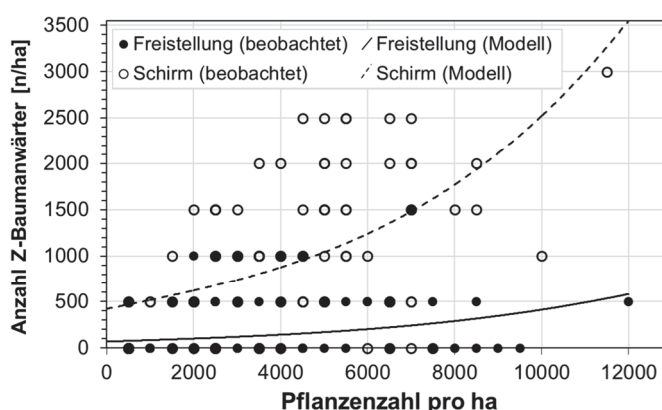


**Abbildung 35:** Grafische Veranschaulichung der Korrelation zwischen beobachteter und durch das Modell aus ASIX, Astwinkel und Zwieselzahl vorhergesagter Qualitätsklasse der Buchen. Die Breite der Balken beschreibt die relative Häufigkeit der beobachteten Qualitätsklassen.



#### 5.4.4 Häufigkeit von Z-Baum-Anwärtern

Die gutachterliche Qualitätsansprache bildete auch die Grundlage der Definition von Zukunftsbaumanwärtern. Das quantitative Auftreten dieser sehr guten und zugleich hoch vitalen Buchen hängt maßgeblich vom Vorhandensein eines Fichtenschirms ab. Die vorliegenden Ergebnisse belegen, dass deren Häufigkeit infolge einer sturmbedingten Freistellung gravierend zurückgeht. Unter Schirm ist pro Hektar Bestandesfläche somit generell eine deutlich größere Anzahl von Z-Baum-Anwärtern zu erwarten (Abbildung 36).



**Abbildung 36:** Anzahl potenzieller Z-Baum-Anwärter pro Hektar Voranbaufläche in Abhängigkeit von der Pflanzendichte im Voranbau sowie der Überschirmungssituation. Die Modellergebnisse gelten unabhängig vom Entwicklungsstadium der Voranbauten.

Das statistische Modell bestätigt den höchst signifikanten Effekt des Fichtenschirms, offenbart aber zugleich einen ähnlich hohen Stellenwert der Pflanzendichte im Voranbau (Tabelle 22). Wird eine Gesamtpflanzenzahl von 6.000 St./ha angenommen, so beträgt die modellierte Zahl der Z-Baum-Anwärter 1.245 St./ha unter Fichtenschirm, während auf den Sturmflächen nur 204 St./ha vorkommen. Steigt die Bestandesdichte im Voranbau auf 10.000 St./ha, so verdoppelt sich die Häufigkeit der Z-Baum-Anwärter auf 2.514 St./ha unter Schirm bzw. 412 St./ha auf der Freifläche. Die Anzahl hoch vitaler und zugleich qualitativ erwünschter Formen steigt demnach unabhängig von der Überschirmungssituation mit zunehmender Pflanzenzahl im Voranbau signifikant an.

**Tabelle 22:** Ergebnisse des generalisierten linearen gemischten Modells zur Schätzung der Anzahl von Z-Baum-Anwärtern pro Hektar in Abhängigkeit von Pflanzendichte und Überschirmungssituation des Voranbaus. Das Intercept bezieht sich auf freigestellte Voranbauten.

feste Effekte		Modell-schätzung	Standard-fehler	p-Wert
Anzahl der Z-Baum-Anwärter [n pro ha]				
$\beta_0$	Intercept	-1,95015	0,2924	<b>0,0000***</b>
$\beta_1$	Schirm	1,80863	0,1856	<b>0,0000***</b>
$\beta_2$	Pflanzenzahl pro Hektar	0,00018	< 0,0001	<b>0,0000***</b>

Als Faustregel kann also gelten, dass die Anzahl der Z-Baum-Anwärter bei gleicher Stammzahldichte des Voranbaus unter Fichtenschirm ca. sechsmal so groß ist wie auf der Freifläche. Dies bedeutet im Umkehrschluss auch, dass durchschnittlich etwa 20–30 % der Individuen eines überschirmten Voranbaus, jedoch lediglich 3–5 % der Individuen einer freigestellten Buchenverjüngung eine sehr gute Qualität und eine hohe soziologische Stellung im Bestand miteinander vereinen. Diese Kausalität gilt gemäß dem statistischen Modell für ein Stammzahlspektrum von 2.000–12.000 St./ha im Buchenvoranbau.

## **5.5 Diskussion**

### **5.5.1 Steilast- und Zwieselbildung**

Mit Blick auf das Produktionsziel Buchenwertholz stellen Steiläste und vor allem Zwiesel ausgesprochen negative Verzweigungstypen dar. Sie sind Anzeichen einer frühzeitigen Schaftauflösung und einer damit einhergehenden Entwertung infolge einer Verringerung der wertholzhaltigen Stammlänge (KRAHL-URBAN 1953; RICHTER 1990; SAGHEB-TALEBI 1996; DRÉNOU 2000; LEDER & HILLEBRAND 2001). In der vorliegenden Arbeit konnten zumindest unter Fichtenschirm ein erstaunlich geringes Auftreten von Steilästen, gleichzeitig jedoch eine sehr hoch erscheinende Zwieselzahl pro Buche beobachtet werden. Ein Vergleich mit Ergebnissen früherer Studien anhand von absoluten Zahlen fällt jedoch schwer, da Zwiesel und Steiläste in der Literatur sehr verschieden definiert (vgl. BÖRNER ET AL. 2003), und oft nur gutachterlich eingeschätzt werden (vgl. GOCKEL 1994; SCHMITT ET AL. 1995; FISCHER 2000; OTT ET AL. 2003) bzw. überhaupt keine Angaben zur Erhebungsmethode gemacht werden (z. B. SCHMALTZ ET AL. 1997). In Jungwüchsen beziffert beispielsweise SAGHEB-TALEBI (1996) den Anteil der Buchen mit Steilästen mit 2,9 %, was deutlich unter den Werten der vorliegenden Arbeit liegt, informiert aber leider nicht über seine Definition von „Steilast“.

Noch deutlicher manifestiert sich diese Problematik im Hinblick auf den Begriff „Zwiesel“. KURTH (1946) und DRÉNOU (2000) verstehen darunter eine in mindestens zwei gleichwertige Triebe aufgelöste Hauptachse. Andere Autoren sehen bereits in steilen Ästen mit sehr starker Konkurrenz zur Hauptachse einen Zwiesel (PETRITAN ET AL. 2010), ohne dass zwangsläufig eine Auflösung der Stammachse gegeben sein muss. Die Konkurrenz zwischen Haupt- und Seitentrieb wird meist anhand von Höhen- und Durchmesserrelation sowie Verzweigungswinkel quantifiziert (LEDER & HILLEBRAND 2001), wobei auch hier keine einheitlichen Grenzwerte verwendet werden (vgl. BÖRNER ET AL. 2003). Missverständlich ist vor allem, dass einige Autoren die Höhe (HAGEMANN 2005; LEDER & HILLEBRAND 2001),

andere hingegen die Länge des Seitenasts als Konkurrenzmaß einsetzen (BÖRNER ET AL. 2003). In der vorliegenden Arbeit wurde ganz bewusst die Höhenrelation herangezogen, da sie ein besserer Indikator für die Konkurrenzstärke des Seitenasts gegenüber dem Terminaltrieb ist, ohne dass eine zusätzliche Angabe des Verzweigungswinkels erforderlich wäre. Die vor allem unter Fichtenschirm sehr hoch erscheinenden Zwieselzahlen, die sich in dieser Untersuchung gezeigt haben, sind somit zumindest teilweise der gewählten Zwieseldefinition geschuldet. Eine Auflösung der Hauptachse wurde ebenfalls nicht explizit gefordert, sodass bereits äußerst konkurrenzstarke Äste unter der Kategorie des Zwiesels subsumiert sind. Darunter befinden sich folglich auch einige Steiläste, welche aber aufgrund ihres enormen Durchmesser- und Höhenwachstums ( $> 75\%$  der Hauptachse) per definitionem den Zwieseln zugeordnet wurden. Dies könnte wiederum die vergleichsweise niedrige Abundanz von Steilästen im Vergleich zu den Zwieseln begründen.

Bedeutsam erscheint auch die Frage nach dem Alter, ab dem ein Zwiesel überhaupt als solcher registriert werden sollte. Einige Autoren empfehlen, nur Zwiesel zu berücksichtigen, die seit mindestens drei Jahren existieren (KURTH 1946; NINGRE & COLIN 2007). Die vorliegende Arbeit folgt dieser Empfehlung, denn neu entstandene Zwiesel sind oft nur temporäre Erscheinungen, die im Lauf der Entwicklung wieder verschwinden können, ohne eine qualitative Auswirkung zu bedingen (DRÉNOU 2000; DONG ET AL. 2007). Ferner ist das Durchmesser Verhältnis zwischen Haupt- und Seitenachse umso enger, je jünger die Triebe sind, was gemäß der zugrunde liegenden Definition eine erhöhte Zwieselpräsenz im obersten Kronenbereich suggerieren würde. Aus qualitativer Sicht sind Zwiesel in diesem jüngsten, wenig differenzierten Kronenbereich jedoch zunächst unbedeutend. Durch das beschriebene Vorgehen bleibt dieses oberste Kronensegment darum außen vor. Bei den hier berücksichtigen Zwieseln kann hingegen von einer längerfristigen Qualitätsbeeinträchtigung ausgegangen werden.

Unabhängig vom absoluten Niveau der *Steilastzahlen* fällt der deutliche Effekt des Schirmverlusts auf, welcher innerhalb von nur sechs Jahren zu einem drastischen Anstieg der Steilasthäufigkeit führte und folglich der bedeutendste aller untersuchten Faktoren ist. Verantwortlich hierfür ist, dass der Durchmesser sowie die Länge der Äste infolge einer Freistellung umgehend ansteigen (LEDER & WEIHS 2000), während der Astwinkel steiler wird (HEIN 2007; KINT ET AL. 2010; STORCH 2011). Allein durch dieses eng korrelierte Reaktionsmuster der drei Einzelparameter ist die größere Häufigkeit von Steilästen an den Buchen auf Sturmflächen zu begründen. Mit Blick auf die Qualität sind Steiläste

ausgesprochen negativ zu bewerten, da ihnen aufgrund ihrer hohen Vitalität und Wuchskraft ein langfristiger Anschluss an das Kronendach und eine effektive Strahlungsaufnahme gelingt. Dadurch leisten sie größere Durchmesserzuwächse, was wiederum ihre Überlebenswahrscheinlichkeit erhöht, im Umkehrschluss aber eine verzögerte Astreinigung zur Folge hat (HEIN 2008; KINT ET AL. 2010; STORCH 2011). Ferner sind Steilläste auch ein Indikator für eine geringe Apikaldominanz der Terminalknospe und weisen auf eine erhöhte Tendenz zur qualitätsmindernden Zwieselbildung und Schaftauflösung hin (RICHTER 1990; LEDER & HILLEBRAND 2001).

Weitaus weniger bedeutsam für die Steilastentwicklung scheint die Pflanzendichte im Voranbau zu sein. Insbesondere im Fall einer plötzlichen Freistellung bleibt ein signifikanter Effekt der Stammzahldichte aus. Einzig unter Fichtenschirm war ein Rückgang der Steilasthäufigkeit infolge steigender Bestandesdichten zu verzeichnen. Aus waldbaupraktischer Sicht ist aber auch dieser Effekt zu vernachlässigen, da die wesentliche Dynamik dieses Prozesses im Stammzahlbereich unter 3.000 St./ha erfolgt. Ursächlich hierfür ist der logarithmisch fallende Verlauf der Modellfunktion. Im Fall eines unplanmäßigen Schirmverlusts kann die Bildung steiler und zugleich starker Äste demzufolge auch durch hohe Pflanzenzahlen im Voranbau nicht unterbunden werden. Offenbar kommen Steilläste jedoch ohnehin fast ausschließlich unter Freiflächenbedingungen vor, während sie unter Fichtenschirm schon bei moderater Pflanzendichte kaum mehr eine Rolle spielen.

Hinsichtlich der Steilastbildung ist es irrelevant, ob die Buchen vor oder nach Erreichen des Dückungsschlusses freigestellt werden. Die unabhängig von der Überschirmung etwas höheren Steilastzahlen der Buchen im Stadium nach Dückungsschluss lässt sich durch alters- bzw. entwicklungsbedingt sukzessiv sinkende Astwinkel erklären (vgl. PRÉVOSTO & CURT 2004; HEIN 2007). KURTH (1946) machte vergleichbare Beobachtungen und verband sie mit Qualitätsverlusten, da in der Folge die Konkurrenz zum Terminaltrieb und somit das Zwieselrisiko zunehmen.

Noch deutlicher werden der Effekt des Schirmverlusts und die damit verbundenen Qualitätseinbußen anhand der *Zwieselzahl der Buchen*. Was die Beziehung von Überschirmung bzw. Strahlungsversorgung und Zwieselbildung anbelangt, sind die Angaben in der Literatur nicht eindeutig. Konträr zu den eigenen Resultaten geht aus einigen früheren Arbeiten eine abnehmende Zwieselwahrscheinlichkeit infolge steigender Strahlungsversorgung hervor. Unter Freiflächenbedingungen wurde demzufolge die geringste

Zwieselbildung festgestellt (STANCIOIU & O'HARA 2006a; PETRITAN ET AL. 2010). Im Gegensatz dazu stützen die meisten Untersuchungen die eigenen Ergebnisse und beschreiben eine streng positive Korrelation zwischen dem Strahlungsangebot bzw. Auflichtungsgrad des Altholzschirms und der Zwieselhäufigkeit (KURTH 1946; BROWN 1952; LE TACON 1985; NICOLINI & CARAGLIO 1994; ROZENBERGAR & DIACI 2014). PETERSEN & WAGNER (1999) sprechen diesbezüglich von der „veredelnden Wirkung“ des Schirms, die dazu führt, dass die Rotbuchen infolge des reduzierten Lichteinfalls wipfelschäftiger aufwachsen und kaum Zwiesel bilden. Den Aussagen von LE TACON (1985) zufolge können Buchen auf Freiflächen bis zu fünf Zwiesel bilden, während nur 2 % der Bäume unter Schirm überhaupt einen zweiten Zwiesel aufweisen. Diese Erkenntnis gleicht den eigenen Beobachtungen. In kanadischen Laubmischwäldern fanden HAGEMANN ET AL. (2013) in unterschiedlich großen Lücken (meist  $< 500 \text{ m}^2$ ) keine Buchen mit Mehrfachzwieselung. Darüber hinaus war kein signifikanter Effekt der Lückengröße auf die Zwieselhäufigkeit nachweisbar. Mit Blick auf die eigenen Ergebnisse legt dies den Schluss nahe, dass bereits ein Mindestmaß an Schirm- bzw. Seitenschutz durch den Altbestand die Zwieselbildung gegenüber einer Freifächensituation erheblich mindern kann.

Als wesentliche Ursache für die erhöhte Zwieselbildung auf der Freifläche wird einerseits die Vitalisierung der oberen Seitentriebe genannt (Verlust der Apikaldominanz), die dadurch in Konkurrenz zur Terminalknospe treten (DUPRÉ ET AL. 1986; ROZENBERGAR & DIACI 2014). Von größerer Bedeutung scheint andererseits aber das polyzyklische Wachstum zu sein. So befähigt der Ressourcenüberschuss auf der Freifläche die Buchen zur proleptischen Triebbildung (LE TACON 1985; DUPRÉ ET AL. 1986; ROLOFF 1986). Speziell die enge Korrelation zwischen Strahlungsangebot und Johannistriebbildung wurde bereits vielfach nachgewiesen (SCHMITT ET AL. 1995; SAGHEB-TALEBI 1996; STANCIOIU & O'HARA 2006a). Konform dazu dokumentierten PETRITAN ET AL. (2010) an bis zu 86 % der auf einem Kahlschlag gepflanzten Buchen Johannistriebe. Hingegen trat nur an ca. 40 % der vorangebauten Buchen in einzelstammweise genutzten Fichtenbeständen Prolepsis auf. NICOLINI & CARAGLIO (1994) ermittelten an 51 % der im Freiland wachsenden, jedoch nur an 14 % der übershirmten Buchen ein polyzyklisches Wachstum. Mit Blick auf die Qualität der Buchen sind Johannistriebe vor allem deshalb problematisch, weil sie erst im Lauf des Sommers gebildet werden, sodass ihre Verholzung und die Ausdifferenzierung der Terminalknospe nur unvollständig erfolgen. Aufgrund von Frost oder biotischen Einwirkungen stirbt die Wipfelknospe deshalb häufig ab. Daraufhin übernehmen mehrere

Seitentriebe die Führung, wodurch es kommt wiederum zur Zwieselbildung (KURTH 1946; LE TACON 1985; NICOLINI & CARAGLIO 1994; SAGHEB-TALEBI 1996; NINGRE & COLIN 2007). Auch ROLOFF (1986) nennt Triebanomalien infolge von Prolepsis als Ursache einer Verzieselung. Der Autor erklärt, dass eine geringe, unvollständige Internodienstreckung des proleptischen Triebs Knospenhäufungen bewirkt. Diese dicht gedrängten Knospen treiben im darauffolgenden Jahr gemeinsam aus, sodass Triebgabelungen entstehen. Folglich resümiert ROLOFF (1986), dass die Verzieselung infolge von Johannistriebbildung eine Konsequenz der schlechten Anpassung der Buche an eine zu frühe Freistellung und eine damit einhergehende ungehinderte Lichtzufuhr ist, deren alleinige Ursache im meist nicht vollständig entwickelten Johannistrieb liegt. Diese umfangreichen Ausführungen belegen übereinstimmend mit den eigenen Erkenntnissen, dass eine plötzliche Freistellung junger Buchen die Zwieselbildung in vielfältiger Weise begünstigt und folglich enorme negative Auswirkungen auf die Qualität hat. Zwar wurden Johannistriebe in der vorliegenden Arbeit nicht explizit erfasst, aufgrund der zuvor geschilderten Kausalitäten sind sie als Ursache der im Vergleich zu den überschirmten Voranbauten doppelt so hohen Zwieselzahlen auf den Freiflächen aber ebenso wahrscheinlich wie die explizit nachgewiesene Vitalisierung starker und steiler Seitentriebe (vgl. Kapitel 4.4.1, S. 91).

Eindeutig sind die Zusammenhänge auch hinsichtlich der Wirkung der Bestandesdichte auf die Zwieselbildung der Buchen. Wie diese und auch frühere Arbeiten gleichermaßen belegen, sinkt die Zwieselhäufigkeit mit zunehmender Pflanzendichte in der Verjüngung (KRAHL-URBAN 1953; ROZENBERGAR & DIACI 2014). Der frühe Dickungsschluss sowie die damit einhergehende intensive Seitendruckkonkurrenz begünstigen ein wipfelschäftiges Wachstum und unterdrücken die Bildung konkurrierender, Zwiesel bildender Seitentriebe (KURTH 1946). Dieser Prozess läuft unabhängig von der Überschirmung ab, sodass auch auf Freiflächen ein deutlicher qualitätsfördernder Effekt hoher Pflanzendichten erkennbar ist (HOUSKOVA & MAUER 2013). In den untersuchten Bestandessituationen bleibt die Bedeutung der Pflanzenzahl pro Hektar im Voranbau dennoch hinter der der pflegenden Wirkung des Fichtenschirms zurück. Selbst bei höchsten Bestandesdichten weisen die Buchen auf Freiflächen durchschnittlich mindestens einen Zwiesel auf und sind damit qualitativ deutlich geringwertiger als vergleichbare Bestände unter Fichtenschirm.

Weniger einleuchtend ist die Zunahme der Zwieselhäufigkeit im Lauf der Bestandesentwicklung, sodass Buchen im Stadium nach Dickungsschluss signifikant größere Zwieselzahlen aufweisen. Dieses Ergebnis steht im Widerspruch zu früheren Forschungen,



die einen Rückgang der Zwieselhäufigkeit mit steigender Baumhöhe beschreiben (TEISSIER ET AL. 1988; HAGEMANN ET AL. 2013). Begründet wird dies mit dem im Zuge der Altersentwicklung wachsenden Konkurrenzdruck. Im Kampf um Licht sind Bäume mit wipfelschäftiger Krone und schnellem Höhenwachstum im Vorteil und setzen sich deshalb durch (ROZENBERGAR & DIACI 2014). Nur KURTH (1946) unterstützt die im Rahmen der vorliegenden Arbeit identifizierten Zusammenhänge, findet jedoch auch keine Erklärung für dieses Phänomen. Eine mögliche Begründung könnte die Auswahl der Prohebäume liefern. Da nur die (vor-)herrschenden und somit höchsten Individuen untersucht wurden, ist es denkbar, dass diese im Stadium nach Dickungsschluss gegenüber dem übrigen Bestand bereits einen so großen Höhenvorsprung hatten, dass sich der obere Kronenbereich nahezu konkurrenzfrei ausbreiten konnte. In Verbindung mit ihrer hohen Vitalität könnte dies wiederum die Zwieselbildung gegenüber den vertikal weniger differenzierten Beständen vor Dickungsschluss begünstigt haben.

Besonders entwertend wirken tief ansetzende Zwiesel, da sie den nutzbaren, wertholzhaltigen Erdstammabschnitt auf eine Länge begrenzen, die deutlich unterhalb der angestrebten liegt (HAGEMANN 2005; LEONHARDT 2006). Die Häufigkeit solcher *Tiefzwiesel* zeigt insbesondere im Stadium vor Dickungsschluss eine sehr klare Abhängigkeit von der Überschirmung. Da die entsprechenden Buchen bei ihrer sturmbedingten Freistellung durchschnittlich erst 2 m hoch waren, bildete ein erheblicher Anteil von ihnen bereits unterhalb von 3 m Zwiesel aus. Der wesentlich geringere Prozentsatz solcher Tiefzwiesel unter Fichtenschirm beweist erneut, dass der Schirmschutz einer frühen Schaftauflösung vorbeugt (RICHTER 1990). Wesentlich stärker als bei der Zwieselzahl pro Baum offenbart sich hier der Effekt der Pflanzenzahl im Voranbau. Der Dichtstand zwingt die Buchen offenbar zu einem forcierten Höhenwachstum und unterdrückt dadurch die Entwicklung Zwiesel bildender Seitentriebe. Je größer die Pflanzendichte in der Verjüngung ist, desto höher setzt der erste Zwiesel an (SCHMALTZ ET AL. 1997; LEONHARDT 2006; HOUSKOVA & MAUER 2013). So stellten MUHLE & KAPPICH (1979) fest, dass der Tiefzwieselanteil von 20 % in Buchenpflanzungen mit 6.000 St./ha auf 7 % bei Pflanzenzahlen von 15.000 St./ha sank. Noch klarer kommt die positive Wirkung des Seitendrucks im Stadium nach Dickungsschluss zum Vorschein. Hier tritt der Effekt des Schirms sogar hinter jenen der Bestandesdichte zurück. Diese Buchen waren bei der Freistellung bereits über 4 m hoch, und zumindest in den stammzahlreichen Voranbauten hatte bereits eine starke intraspezifische Konkurrenz eingesetzt. Dementsprechend war auch die Astreinigung bereits im Gange, sodass das Risiko einer Zwieselbildung im unteren

Schaftabschnitt generell gering war und auch durch die Freistellung nicht merklich stieg. Im Hinblick auf eine mögliche Risikovorsorge bedeutet dies, dass Pflanzendichten ab 9.000 St./ha die Entstehung von Tiefzwieseln auch bei einem Schirmverlust nahezu vollständig unterbinden können, wenn die Voranbauten den Dickungsschluss bereits erreicht haben.

### **5.5.2 Qualitative Gesamteinschätzung**

Die gutachterliche Qualitätsansprache bringt die zuvor anhand von Einzelparametern aufgezeigten gravierenden Qualitätsverluste infolge der Freistellung besonders eindrucksvoll zutage. Dies gilt zunächst völlig losgelöst von Entwicklungsstadium und Pflanzendichte im Voranbau. Das vorgefundene Bild untermauert die enorme morphologische Plastizität der Buchenkrone und ihre strenge Abhängigkeit von den Umweltbedingungen (ROLOFF 1986; RICHTER 1999; BARBEITO ET AL. 2014). Eine solche unmittelbare und reversible Reaktion des Baumhabitus infolge veränderter Umwelteinflüsse bezeichnet OTTO (1994) als modulative, phänotypische Anpassung. In diesem Kontext erwähnt ROLOFF (1986) die Fähigkeit der Buche zur adaptiven Reiteration durch die Umorientierung von Seitentrieben, welche einen natürlichen Anpassungsmechanismus an eine plötzlich erhöhte Strahlungszufuhr darstellt. Durch orthotropes, proleptisches Austreiben der oberen Seitenknospen am Terminaltrieb entstehen starke Konkurrenten, welche aufgrund ihrer aufrechten Position schnell selbst zu Wipfeltrieben werden, wodurch wiederum Zwiesel und Kronenverbuschungen entstehen (ROLOFF 1986).

Die Abhängigkeit der Wuchsform junger Buchen von der Intensität der Altholzüberschirmung wurde vor dem Hintergrund der Qualitätsholzproduktion bereits umfänglich erforscht. Es besteht weitgehend Einigkeit darüber, dass der höchste Anteil (sehr) guter, das heißt wipfelschäftiger und feinastiger Buchen bei moderater Überschirmung auftritt (SCHMITT ET AL. 1995; SAGHEB-TALEBI 1996; SAGHEB-TALEBI & SCHÜTZ 2002; WAGNER ET AL. 2010). Unter locker-lichtem Fichtenschirm wurden in dieser Arbeit meist über 90 % (sehr) guter Formen gefunden. Die Grundflächenhaltung der Fichtenbestände von 25–35 m<sup>2</sup>/ha (B° 0,5–0,7) ist demnach hinsichtlich der Qualitätsentwicklung der vorangebauten Buchen als ausgesprochen günstig einzuschätzen (vgl. HERTRAMPF 2009). Eine weitere Erhöhung der Lichtangebots oder gar eine komplette Freistellung der Buchen verschiebt die Qualitätsverteilung deutlich in Richtung unerwünschter, das heißt zwieseliger und verbuschter Typen (LEDER & WEIHS 2000; WEIHS & KLAENE 2000; SHAHNAVAZI ET AL. 2005;

ROZENBERGAR & DIACI 2014). Erstaunlich ist jedoch, dass die Buchen innerhalb von nur sechs Vegetationsperioden nach KYRILL einen derart starken Qualitätsverlust erlitten, dass sie mit Freiflächenpflanzungen vergleichbar sind. OTT ET AL. (2003) beziffern den Anteil unerwünschter Formen in Buchenkulturen auf Sturmflächen mit ca. 50 %. LE TACON (1985) beschreibt, dass sogar 80 % der Bäume in Freiflächenpflanzungen mindestens einmal gezwieselt waren. Dass diese Ausführungen den eigenen Befunden stark ähneln, beweist, dass sich der einstige pflegende Effekt des Fichtenschirms innerhalb weniger Jahre nach dessen Wegfall vollständig verliert.

Ein positiver Einfluss hoher Pflanzendichten, wie er anhand zahlreicher Einzelparameter aufgezeigt wurde, konnte für die Qualitätsklassen nicht statistisch abgesichert werden. Unter Umständen ist dies der ungleichmäßigen und teils sehr geringen Besetzung einzelner Faktorstufenkombinationen geschuldet. Gleichwohl waren dahin gehende Tendenzen erkennbar, welche durch frühere Arbeiten unterstützt werden. So wurde wiederholt dargelegt, dass der Anteil angestrebter Qualitäten in überschirmten Buchenverjüngungen mit zunehmender Bestandesdichte steigt (KLEIN 1983; RUMPF & PETERSEN 2008; ROZENBERGAR & DIACI 2014). Ähnliche Zusammenhänge gelten aber auch für Freiflächenpflanzungen (OTT ET AL. 2003; HOUSKOVA & MAUER 2013). In der Gesamtbetrachtung bestätigen die vorliegenden Ergebnisse jedoch, dass die pflegende Wirkung des Fichtenschirms nicht durch einen hohen Seitendruck ersetzt werden kann. Ein überwiegender Prozentsatz (sehr) guter Buchentypen war nur bei der Kombination von moderater Überschirmung und hoher Pflanzendichte im Voranbau vorzufinden (LEDER & WEIHS 2000; HAGEMANN 2005; LEONHARDT & WAGNER 2006). Obwohl die guten Bäume auch auf den Sturmflächen spürbar zunahmen, blieb eine umfängliche Kompensation des Freistellungseffekts durch hohe Pflanzenzahlen im Voranbau aus.

### **5.5.3 Charakterisierung der Qualitätsklassen**

Anhand von Schaft- und Kronenmerkmalen gutachterlich durchgeführte Qualitätsansprachen sind vor allem bei praxisorientierten Untersuchungen durchaus üblich (vgl. FABRICIUS 1929; OTT ET AL. 2003; HAGEMANN 2005; LEONHARDT & WAGNER 2006). Problematisch ist jedoch, dass die Einschätzung stark vom subjektiven Eindruck des Gutachters abhängt. Ferner besteht die Gefahr, dass der Qualitätsmaßstab unbewusst an die jeweilige Bestandessituation angepasst wird (KURTH 1946). Dadurch wird die Realität jedoch verfälscht und ein Vergleich mit anderen Arbeiten erschwert. Zudem sind solche Ergebnisse kaum reproduzierbar. Aus

diesen Gründen wurde geprüft, inwiefern die vier Qualitätsklassen über metrische Größen wie relativer Astdurchmesser (ASIX), Astwinkel sowie Zwieselzahl einer Buche differenziert und beschrieben werden können. Die Auswahl der erklärenden Größen erfolgte gemäß den bei der Qualitätsansprache verwendeten Kronenparametern (vgl. Tabelle 17, S. 113). Ziel dieser Prozedur war es, einen Eindruck davon zu vermitteln, wie die gutachterlich angesprochene Qualität mit der gemessenen Qualität der Bäume korreliert.

Die dabei erzielten Modellergebnisse belegen den negativen Effekt starker und steiler Äste auf die Buchenqualität sehr deutlich (vgl. LEDER & HILLEBRAND 2001; KINT ET AL. 2010; HAGEMANN ET AL. 2013). Erwartungsgemäß zeigt das Modell, dass Bäume der Qualitätsklasse 1 (sehr gut) wipfelschäftig sind und horizontal ausgerichtete, gering dimensionierte Äste haben. Je größer der ASIX, desto eher wird ein Baum einer schlechteren Qualitätsklasse zugewiesen. Zudem sinkt die Güte mit abnehmendem Astwinkel, sodass Zwieseltypen die steilsten Winkel aufweisen (KURTH 1946; HENGST 1964). Überaus entwertend wirken wiederholte Verzweigungen, welche vor allem in Kombination mit großen Astwinkeln eine weit ausladende, verbuschte Krone anzeigen. Solche Bäume wurden bei der Qualitätsansprache vorwiegend der Kategorie „unzureichend“ zugewiesen. Die Modellschätzung erscheint soweit äußerst plausibel. Verwunderlich ist nur, dass laut Modell auch gute Bäume (Qualitätsklasse 2) durchschnittlich einen Zwiesel besitzen sollen. Ursächlich dafür ist vermutlich die bereits kritisch diskutierte Zwieseldefinition, welche allein auf der Höhen- und Durchmesserrelation von Haupt- und Seitenachse basiert. Dadurch kann der Fall eintreten, dass ein Baum mit guter Stammform und starken, steilen Ästen, jedoch ohne erkennbare Schaftauflösung rein gutachterlich der Qualitätsklasse 2 zugeordnet wurde, die metrische Aufnahme einen der steilen Grobäste aber als Zwiesel auswies. Zwischen der metrischen Zwieseldefinition und dem Anspracheschlüssel des gutachterlichen Verfahrens besteht demnach eine methodische Diskrepanz. Diese führt im statistischen Modell dazu, dass vermeintlich gute Bäume bereits Zwiesel vorweisen können.

In der Gesamtbetrachtung bekundet das Modell jedoch klar, dass die gutachterliche Qualitätsansprache sehr präzise durch gemessene Werte untermauert werden kann. Die signifikante Differenzierung der Merkmalsausprägungen zwischen den vier Qualitätsklassen zeigt einerseits, dass sich die verschiedenen Buchentypen dahingehend maßgeblich voneinander unterscheiden und die gewählten Parameter zur Erklärung der Qualität somit bestens geeignet sind (vgl. HAGEMANN ET AL. 2013). Dies spiegelt sich auch in der hohen Korrelation von gutachterlich erhobener und durch das Modell aus ASIX, Astwinkel und

Zwieselzahl vorhergesagter Qualitätsklasse wider. Andererseits beweist die durchgeführte Prozedur aber auch, dass gutachterliche Verfahren durchaus reproduzierbar und objektiv nachvollziehbar sind.

#### **5.5.4 Häufigkeit von Z-Baum-Anwärtern**

Die im Vorfeld umfassend dargestellten, freistellungsbedingten Qualitätseinbußen schlagen sich erwartungsgemäß auch in einer wesentlich geringeren Abundanz von Zukunftsbaumanwärtern auf den Sturmflächen nieder. Wenngleich dieser Zusammenhang zunächst unabhängig von der Pflanzenzahl im Voranbau gilt, stellte sich dieser Faktor als wesentliche Stellschraube heraus. Denn während zum gegenwärtigen Zeitpunkt unter Fichtenschirm generell eine sehr große und jedenfalls hinreichende Anzahl von Z-Baum-Anwärtern vorzufinden ist, ist diese auf den Freiflächen nur durch entsprechend hohe Pflanzendichten zu erreichen. Demzufolge stellt sich die Frage, wie viele Buchen pro Hektar erforderlich sind, um auch bei einem unplanmäßigen Schirmverlust eine ausreichende Anzahl hoch vitaler Bäume bester Qualität zu gewährleisten.

Diesbezüglich ist zunächst zu klären, wie viele Z-Baum-Anwärter im älteren der beiden hier untersuchten Entwicklungsstadien (nach Dickungsschluss) überhaupt notwendig sind (natürliche Altersstufe: schwaches Gertenholz). Z-Baum-Zahlen und entsprechende Durchforstungsstrategien wurden in der forstwissenschaftlichen Literatur der letzten drei Jahrzehnte äußerst kontrovers diskutiert (KLEIN 1990; SPELLMANN 2005; NAGEL & SPELLMANN 2008). Die einen plädieren für die frühzeitige, einmalige Festlegung eines an der Endbaumzahl orientierten Z-Baum-Kollektivs zwischen 60 St./ha und 110 St./ha in Buchenbeständen und deren konsequente Förderung (ABETZ 1974, 1979; WILHELM ET AL. 1999a; KLÄDTKE 2002; HEIN ET AL. 2007a; SCHUSTER 2009). Andere sprechen sich dagegen für eine anfangs höhere Zahl von 300–500 Z-Baum-Anwärtern pro Hektar und deren kontinuierliche Auslese aus (LEIBUNDGUT 1978; LÜPKE 1986; SCHÖBER 1988; FLEDER 1990; KLEIN 1990). Gemäß letzterem Ansatz erachten auch aktuellere Konzepte eine Reserve als wichtig und setzen die Z-Baum-Zahl mit 140–160 St./ha deshalb deutlich über der Endbaumzahl an. Dies geschieht nicht zuletzt aus Gründen der Risikoversorge sowie einer höheren Flächenproduktivität (SPELLMANN 2005; NAGEL & SPELLMANN 2008). Diese Unstimmigkeiten beruhen auf divergierenden Ansichten über das negative Umsetzen, das heißt über das soziologische und/oder qualitative Absteigen einzelner Z-Bäume im Lauf der Bestandesentwicklung, die dafür verantwortlichen Ursachen sowie mögliche

Vorsorgemaßnahmen (ABETZ 1989; SCHOBER 1990; SPELLMANN & DIEST 1990). Beispielsweise fielen in niedersächsischen Buchendurchforstungsversuchen innerhalb eines 14-jährigen Beobachtungszeitraums 25 % der Z-Bäume aus (NAGEL & SPELLMANN 2008). Für die hier untersuchten Bestandessituationen ist die Erkenntnis von KURTH (1946) besonders hervorzuheben. Er wies nach, dass in Buchenbeständen auf Freiflächen nahezu ausschließlich negative Umsetzungsprozesse ablaufen, während in übershirmten Dickungen auch Qualitätsverbesserungen stattfinden (positives Umsetzen). Ersteres ist vor allem der überlegenen Vitalität und Konkurrenzkraft großkroniger, jedoch schlecht geformter Buchen („Wölfe“) geschuldet (vgl. KRAHL-URBAN 1953; FREIST 1980; FLEDER 1990; RICHTER 1990), welche sich nach einer Freistellung verstärkt durchsetzen. Dies spricht ebenfalls für eine Stammzahlreserve bei der Z-Baum-Auswahl, namentlich auf Sturmflächen.

Wie hoch das Auswahlkollektiv demzufolge anzusetzen ist, hängt weiterhin von der Zuverlässigkeit der Vitalitäts- und Qualitätsbeurteilung zum Auswahlzeitpunkt ab, vor allem mit Blick auf die zukünftige Entwicklung. In den untersuchten Voranbauten ist eine solche Einschätzung gegenwärtig mit ganz erheblichen Unsicherheiten behaftet (vgl. OTT ET AL. 2003; RÖHRIG ET AL. 2006), da die Buchen noch am Anfang der Qualifizierungsphase stehen. Eine zuverlässige Ansprache und Auswahl von Z-Bäumen bzw. Anwärtern kann erst erfolgen, wenn die angestrebte astfreie Schaftlänge von meist 25–30 % der Endbaumhöhe erreicht ist. Diese liegt je nach Standort zwischen 6 m und 10 m und tritt frühestens im Alter von 40 Jahren ein (LÜPKE 1986; KLÄDTKE 2002; NAGEL & SPELLMANN 2008). Bei den hier untersuchten Buchen war die Astreinigung auf höchstens 2,5 m vorangeschritten. Bei der Interpretation der vorliegenden Ergebnisse ist darum unbedingt zu beachten, dass diese bestenfalls einen ersten Anhaltspunkt zur Häufigkeit von Z-Baum-Anwärtern und ihrer Abhängigkeit von der Stammzahldichte des Voranbaus darstellen. Keineswegs erlauben sie jedoch Aussagen über die endgültigen Z-Baum-Zahlen.

Unter Berücksichtigung der geschilderten Aspekte werden für die hier analysierten Voranbauten, bezogen auf das gegenwärtige Gertenholzstadium, mindestens 300 Z-Baum-Anwärter pro Hektar als notwendig erachtet. Um dieses Ziel auf den Sturmflächen zu erreichen, darf die Gesamtpflanzendichte 8.000 St./ha nicht unterschreiten, wie aus dem statistischen Modell hervorgeht. Diese zunächst recht groß erscheinende Anwärterzahl trägt vor allem dem in der ersten Lebenshälfte sehr hohen Risiko des Umsetzens Rechnung (vgl. LEIBUNDGUT 1978). Gestützt wird die eigene Einschätzung durch OTT & LÜPKE (2006), welche 300 gute, herrschende Bäume im Stangenholzstadium unter Berücksichtigung



möglicher Entwertungen und Verluste als Mindestanforderung für eine Buchenwertholzproduktion ansehen. Um diese Zahl auf Sturmflächen zu realisieren, müssen nach Kalkulationen der Autoren 8.000–10.000 St./ha gepflanzt werden (OTT & LÜPKE 2006).

Hinsichtlich der Übertragbarkeit der eigenen Modellergebnisse auf die Praxis sind einige methodische Aspekte zu berücksichtigen. So orientiert sich die Auswahl von Z-Bäumen bzw. -Anwärttern gemeinhin an den Kriterien Vitalität, Qualität und räumliche Verteilung (ABETZ 1974, 1979; LEIBUNDGUT 1978; SCHÖBER 1990). Das in dieser Arbeit erstellte Modell ermittelt jedoch lediglich die Gesamtzahl der Bäume höchster Vitalität und Qualität pro Hektar. Ihre räumliche Verteilung bleibt dagegen unberücksichtigt. Somit ist es denkbar, dass mehrere potenzielle Anwarter in unmittelbarer Nachbarschaft stehen, die jedoch perspektivisch nicht alle gefördert werden. Zudem war die Untersuchung auf Bereiche des Voranbaus ohne stärkere Schäden und Stammzahlverluste infolge des Sturmwurfs sowie der anschließenden Aufarbeitung und Rückung beschränkt. Natürlicherweise würde sich die Abundanz der Z-Baum-Anwarter dadurch nochmals reduzieren. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass gegebenenfalls noch höhere Stammzahldichten im Voranbau nötig sein könnten als die hier errechneten 8.000 St./ha, um mindestens 300 Z-Baum-Anwarter pro Hektar zu erreichen. Diese scheinen im Gertenholz mindestens erforderlich, um eine gewisse Risikovorsorge und Flexibilität für die zukünftige Bestandesbehandlung sicherzustellen. Je nach Zieldurchmesser und dementsprechender Standraumanforderung entspricht das in etwa der drei- bis vierfachen Z-Baum-Zahl im Endbestand eines Buchenreinbestands (vgl. ABETZ 1979; UTSCHIG 2000; KLÄDTKE 2002; NAGEL & SPELLMANN 2008; LANGHAUSEN 2009; KOHNLE ET AL. 2014). Die dafür erforderliche enorm hohe Pflanzendichte im Voranbau zeigt jedoch, dass das Produktionsziel Buchenwertholz unter Freiflächenbedingungen durch sehr hohe Aufwendungen (Begründungskosten) erkauft werden muss. Der relative Anteil qualitativ erwünschter und zugleich vitaler Buchen ist in sturmbedingt freigestellten Voranbauten außerordentlich gering. Ist Buchenwertholz also selbst bei unsicheren Rahmenbedingungen das erklärte Ziel, kann dieses nur durch sehr hohe Pflanzendichten im Voranbau abgesichert werden.

Diesbezüglich empfiehlt SCHÜTZ (2000), in Buchenbeständen mit nur geringen Anteilen guter Formen schon in der Dickungsphase und somit sehr früh mit einer Vorauslese und mäßigen Förderung zu beginnen. Eingriffe sollten in minimalem Umfang und lediglich zur Entnahme wirklich bedrängender Wölfe erfolgen, damit der Dichtschluss und somit die Astreinigung gewahrt bleiben (SCHÜTZ 2000; NEUMANN & RÖSSLER 2006). Ein ähnliches Vorgehen ist

auch für die hier untersuchten Buchenvoranbauten auf Sturmflächen denkbar. Eine generelle Förderung der Z-Baum-Anwärter erscheint zum gegenwärtigen Zeitpunkt weder hilfreich noch notwendig. Lediglich in Einzelfällen, wo sich die Konkurrenzverhältnisse schon jetzt massiv zuungunsten der Z-Baum-Anwärter verschieben, kann deren vorsichtige Begünstigung, z. B. durch Ringeln oder die Entnahme eines Bedrängers, hilfreich sein (vgl. WILHELM ET AL. 1999b; LAF 2002).

## **5.6 Waldbauliche Schlussfolgerung**

Für viele Forstbetriebe ist die Bewirtschaftung von Buchenbeständen untrennbar mit dem Produktionsziel Buchenwertholz verbunden (vgl. ECKARDT & ARENHÖVEL 2006; NEUMANN & RÖSSLER 2006; LANGHAUSEN 2009; SACHSENFORST 2013b). Die Qualität junger Buchen wird in der Praxis vor allem an ihrer Stamm- und Kronenform bemessen. Die vorliegende Untersuchung lässt einige waldbaulich hilfreiche Schlussfolgerungen zu, wie sich diese Qualitätsmerkmale infolge einer plötzlichen Freistellung vorangebauter Buchen verändern, welche Auswirkungen dies auf die Häufigkeit potenzieller Z-Bäume hat und wie damit zukünftig umgegangen werden sollte.

Die Ergebnisse belegen den hohen Stellenwert des Fichtenschirms für den Qualifizierungsprozess vorangebauter Buchen unmissverständlich. Unabhängig von Pflanzendichte und Entwicklungsstadium des Voranbaus geht eine plötzliche Freistellung mit gravierenden Qualitätsverlusten einher. Diese äußern sich vor allem in einer verstärkten Zwieselbildung. Durch die moderate Reduzierung des Lichtangebots beugt der Schirm der Johannistriebbildung vor und verhindert ein unkontrolliertes Wachstum starker, steiler Seitentriebe, die eine wesentliche Ursache der Zwieselbildung darstellen. Dadurch wachsen Buchen unter Fichtenschirm zumeist wipfelschäftig und entwickeln die angestrebte „edle Halbschattform“ (vgl. PETERSEN & WAGNER 1999; AMMER 2000; WEIHS & KLAENE 2000).

Problematisch erscheint vor allem eine abrupte und unvorbereitete Freistellung von an den Halbschatten adaptierten Buchen. Diese werden daraufhin häufig durch Klimaextreme geschädigt (ROLOFF 1986; NICOLINI & CARAGLIO 1994). Für die waldbauliche Behandlung vorangebauter Fichtenbestände heißt dies, dass frühzeitige Räumungen unterbleiben müssen. Lange Überschirmungszeiträume und schrittweise Nachlichtungen erlauben den Buchen die allmähliche Adaption an die erhöhte Strahlungsversorgung. Ein Freistellungsschock bleibt weitgehend aus, was wiederum einen positiven Effekt auf die Qualität hat (MLINSEK & BAKKER 1990). Zugleich wird der Zuwachs des Fichtenaltholzes ausgenutzt (SPELLMANN &

WAGNER 1993; WAGNER & MÜLLER-USING 1997). Stabile Fichtenschirme bilden die Grundlage dieses Vorgehens. Der Stabilitätssituation sollte deshalb bei der Auswahl von Beständen für einen wertholzorientierten Buchenvoranbau besondere Beachtung zukommen.

Mit zunehmender Pflanzendichte im Voranbau verbessert sich die Qualität der Buchen. Eine umfängliche Kompensation des Freistellungseffekts bleibt jedoch aus. Hohe Pflanzenzahlen können freistellungsbedingte Qualitätsverluste demnach mindern, nicht jedoch verhindern. Wichtig erscheint die Erkenntnis, dass stark entwertenden Tiefzwieseln durch hohe Pflanzenzahlen und einen entsprechend zügigen Dickungsschluss auch im Fall eines Schirmverlusts vorgebeugt werden kann. Insgesamt sind die Qualitäten auf den Sturmflächen vor allem aufgrund der starken Zwieselbildung aber selbst bei höchster Bestandesdichte deutlich schlechter als unter Fichtenschirm. Die Schirmwirkung kann folglich nicht durch verstärkten Seitendruck substituiert werden. Erhebliche Anteile (sehr) guter Qualitäten treten nur bei der Kombination von moderater Überschirmung und hoher Pflanzendichte im Voranbau auf (LEDER & WEIHS 2000; HAGEMANN 2005; LEONHARDT & WAGNER 2006).

Es erwies sich als nachrangig für die Qualität der Buchen, ob die Freistellung vor oder nach Erreichen des Dickungsschlusses eintrat. Unabhängig davon kommt es häufig zu einer Verzwieselung und Auflösung des oberen Kronenbereichs sowie zu einer erhöhten Bildung starker, steiler Äste. Dies lässt sich auch durch die starke intraspezifische Konkurrenz in Buchendickungen nicht verhindern.

Die anhand von relativem Astdurchmesser, Astwinkel und Zwieselzahl vorhergesagte Qualitätsklasse einer Buche besitzt eine sehr hohe Übereinstimmung mit der gutachterlichen Ansprache. Dies belegt einerseits, dass die Qualität maßgeblich von den zuvor genannten Parametern abhängt, welche folglich bei der Z-Baum-Auswahl besondere Beachtung finden sollten (KINT ET AL. 2010). Andererseits beweist dies, dass auch mittels gutachterlicher Verfahren durchaus präzise und reproduzierbare Ergebnisse zu erzielen sind. Die gutachterliche Qualitätsansprache wird deshalb als adäquate und einfache Methode für praxisorientierte Untersuchungen empfohlen.

In überschirmten Voranbauten finden sich unabhängig von der Bestandesdichte rund sechsmal so viele Z-Baum-Anwärter pro Flächeneinheit wie auf den Sturmflächen. Nur durch eine deutliche Erhöhung der Pflanzenzahl im Voranbau kann auch für den Fall eines unplanmäßigen Schirmverlusts vorgesorgt werden. Beträgt die Gesamtstammzahl nicht weniger als 8.000 St./ha, kommen auch in den freigestellten Voranbauten ca. 300 Z-Baum-

Anwärter pro Hektar vor. Diese werden in der Entwicklungsphase des schwachen Gertenholzes als Mindestanforderung verstanden.

Auch die Ergebnisse der Einzelparameter legen den Schluss nahe, dass Pflanzendichten von 6.000–8.000 St./ha in Kombination mit einem locker-lichten Fichtenschirm keinesfalls unterschritten werden sollten. Vor allem mit Blick auf den Tiefzwieselanteil sowie die Häufigkeit von Z-Baum-Anwärtern wird klar, dass noch höhere Pflanzenzahlen zu einer weiteren deutlichen Qualitätssteigerung beitragen. Deshalb werden 8.000–10.000 Buchen pro Hektar hinsichtlich der Qualitätsentwicklung als optimal eingeschätzt (KLEIN 1983; OTTO 1985; SCHENK 1994; SACHSENFÖRST 2013b).

Aufgrund der erheblichen finanziellen Aufwendungen, die mit solchen Buchenvoranbauten verbunden sind, wird eine risikoabhängige Differenzierung des Produktionsziels und damit der Intensität von Waldumbaumaßnahmen dringend empfohlen (vgl. HANSEN & SPIECKER 2005). Durch eine Konzentration der Wertholzproduktion auf Standortbereiche mit niedrigem Kalamitätsrisiko für Fichtenschirme ist dieses Ziel mit geringerem Einsatz (vgl. Relation Z-Baum-Anwärter vs. Gesamtpflanzenzahl) und größerer Wahrscheinlichkeit erreichbar als bei unsicheren Rahmenbedingungen. Bei einer offensichtlichen Prädisposition der Fichtenschirme gegenüber Sturm und Borkenkäferbefall ist stattdessen ein extensiver Voranbau mit reduzierter Pflanzenzahl vorzuziehen. Dieser zielt im Sinne eines nachhaltigen Umbaus primär auf eine Stabilisierung der Waldökosysteme ab und trägt zur Erhöhung der Flexibilität der zukünftigen Waldbewirtschaftung bei (WAGNER 2007, 2008).

## **5.7 Zusammenfassung**

Kern der vorliegenden Forschungsarbeit sind die Folgen eines sturmbedingten Verlusts des Fichtenschirms auf die qualitätsrelevanten Kronenmerkmale vorangebauter Buchen (*Fagus sylvatica* L.). Ferner wurden in diesem Zusammenhang die Effekte von Pflanzendichte und Entwicklungsstadium der Voranbauten (Dickungsschluss) analysiert. Die Untersuchung fand in 29 mit Buche vorangebauten Fichtenbeständen des Thüringer Waldes und des Erzgebirges statt, darunter 17 mit sturmbedingtem Schirmverlust durch den Orkan KYRILL im Januar 2007.

Erfasst wurden die Häufigkeit von Steilästen und Zwieseln sowie die Ansatzhöhe des untersten Zwiesels eines Baums. Dadurch konnten Tiefzwiesel ermittelt werden. Weiterhin erfolgte eine gutachterliche Qualitätsansprache anhand der Schaft- und Kronenform der

Buchen (vgl. LEONHARDT & WAGNER 2006). Bäume der Qualitätsklasse 1 (sehr gut), die mindestens 80 % der Maximalbaumhöhe eines Probekreises erreichten, wurden als Z-Baum-Anwärter definiert. Zur statistischen Auswertung der Zwiesel- und Steilasthäufigkeiten dienten generalisierte lineare gemischte Modelle (GLMM). Die Abbildung der Qualitätsparameter geschah im Modell über eine lineare Beziehung aus den festen Effekten Schirm, Pflanzenzahl pro Hektar und Entwicklungsstadium des Voranbaus. Die gutachterliche Qualitätsansprache wurde mithilfe eines Proportional Odds Logistic Regression Model (POLR) analysiert.

Sechs Jahre nach dem Schirmverlust sind an freigestellten Buchen signifikant häufiger Steiläste und vor allem Zwiesel erkennbar. Im Stadium vor Dickungsschluss treten auf Freiflächen doppelt bis dreifach so häufig Tiefzwiesel auf wie unter Fichtenschirm. Mit zunehmender Pflanzenzahl im Voranbau sinkt die Zwieselanzahl moderat, der Anteil tief gezwieselter Buchen sogar rapide. Dadurch kommen ab 9.000 Buchen pro Hektar im Stadium nach Dickungsschluss kaum noch Tiefzwiesel vor. Dies gilt unabhängig von der Überschirmung. Die gutachterliche Qualitätsansprache bestätigt, dass durchschnittlich etwa 60–70 % aller Buchen auf den KYRILL-Flächen den Zwieseltypen zuzuordnen sind, während unter Fichtenschirm mit ca. 90 % die (sehr) guten Formen dominieren. Mit zunehmender Bestandesdichte steigt der Anteil besserer Qualitäten tendenziell, jedoch nicht signifikant an. Die gutachterliche Qualitätsansprache weist eine sehr hohe Übereinstimmung mit der anhand von ASIX, Astwinkel und Zwieselzahl einer Buche modellierten Qualitätsklasse auf. Unter Fichtenschirm ist die Dichte der Z-Baum-Anwärter grundsätzlich sechsmal so hoch wie in freigestellten Voranbauten. Diese steigt aber unabhängig vom Schirm mit der Pflanzendichte des Voranbaus signifikant an.

Die Ergebnisse belegen, dass ein plötzlicher Schirmverlust grundsätzlich gravierende Qualitätsverluste nach sich zieht. Eine Kompensation dieses Effekts durch hohe Pflanzenzahlen im Voranbau ist nur in sehr begrenztem Umfang möglich. So gewährleiten Pflanzendichten ab 8.000–9.000 St./ha, dass die Tiefzwieselbildung in geschlossenen Buchendickungen auch bei einer abrupten Freistellung weitgehend unterbleibt und eine hinreichende Anzahl von Z-Baum-Anwärtern zur Verfügung steht. Insgesamt deutet jedoch vieles darauf hin, dass das Produktionsziel Buchenwertholz mit geringerem Aufwand und größerer Wahrscheinlichkeit erreicht wird, wenn eine langfristig stabile Überschirmung gegeben ist.

## **6 Zusammenführende Diskussion**

### **6.1 Methodendiskussion**

#### **6.1.1 Repräsentativität und Vergleichbarkeit der Versuchsflächen**

Aufgrund der Vielzahl der bei der Versuchsflächenauswahl zu berücksichtigenden Faktoren und der insbesondere auf den Orkanflächen gegebenen Heterogenität der Bestandessituationen gestaltete sich die Zusammenstellung eines in sich vergleichbaren sowie für den Untersuchungsgegenstand repräsentativen Versuchsflächennetzes ausgesprochen schwierig. Ausgehend von einem umfangreichen Pool an KYRILL-Schadflächen zwangen die gesetzten Restriktionen zum Ausschluss zahlreicher Bestände (vgl. Abschnitt 2.2.2, S. 16). Um das für die Untersuchung erforderliche Flächenspektrum überhaupt abdecken zu können, mussten letztlich Kompromisse eingegangen werden. Welche Auswirkungen dies auf die vorliegenden Forschungsergebnisse haben kann, soll an dieser Stelle kritisch diskutiert werden.

#### Klimatische Bedingungen – forstliche Klimastufe

Von den oben beschriebenen Zusammenhängen waren in besonderer Weise die klimatischen und standörtlichen Verhältnisse der Flächen betroffen. Im zunächst gewählten Klimabereich der unteren und mittleren (sehr) feuchten Berglagen konnten zum einen nicht hinreichend viele hinsichtlich der Bestockungssituation geeignete Bestände identifiziert werden. Zum anderen offenbarten die eingangs durchgeführte Datenbankanalyse sowie die Revierleiterbefragungen eine besonders hohe Präsenz von KYRILL-Flächen in der Klimastufe der höheren Berglagen, darunter auch solche mit Buchenvoranbauten. Dieses Phänomen erscheint insofern plausibel, als bereits nachgewiesen wurde, dass die Intensität von Sturmereignissen bis zu einer bestimmten Meereshöhe zunimmt (SCHMIDTKE & SCHERRER 1997). Analysen nach dem Orkan KYRILL in Thüringen offenbarten zudem eine positive Korrelation zwischen der im Vorfeld sowie während des Sturms gefallenen Regenmenge und der Höhenlage. In Kombination mit fehlendem Bodenfrost führte dies zu einer verstärkten Disposition der Fichtenbestände auf den wassergesättigten Standorten der höheren Lagen (CLASEN ET AL. 2008). Daraus ist auch abzuleiten, dass die praktische Relevanz der untersuchten Problematik über den anfangs gewählten Standortbereich hinausgeht, was für eine Ausweitung der Arbeit auf die höheren Berglagen sprach. Diesbezüglich betonen WAGNER & HENKEL (1993), dass die Buche auch in den Hochlagen des Thüringer Waldes standortgerecht ist, sodass dort große Flächen mit Buche umzubauen sind. Für die



Sächsischen Mittelgebirge werden Buchenmischbestände mit dem Produktionsziel Wertholz unter durchaus vergleichbaren Bedingungen ebenfalls als geeignete Bestandeszieltypen ausgewiesen (EISENHAUER ET AL. 2005; SACHSENFORST 2013c). IRRGANG (2002) gibt in diesem Kontext zu bedenken, dass im Zuge des Klimawandels eine Verschiebung der höhenzonalen Gliederung der Waldgesellschaften eintreten wird, wodurch Buchenwälder künftig auch in höheren Lagen zunehmend an Bedeutung gewinnen werden.

Obwohl all diese Aspekte für die Einbeziehung der höheren Berglagen sprachen, war zu bedenken, dass sich die in Abhängigkeit von der Höhenlage verändernden Klimaverhältnisse auf das Wachstum der Buche auswirken (DITTMAR & ELLING 1999; DITTMAR ET AL. 2003; ALBERT & SCHMIDT). Um klimatisch bedingte Wachstumsunterschiede gegenüber den Beständen der unteren und mittleren Berglagen möglichst gering zu halten und die Vergleichbarkeit aller ausgewählten Bestände zu gewährleisten, wurde bei der Flächenauswahl eine absolute Obergrenze von 750 m ü. NN festgesetzt. Alle vier in den höheren Berglagen für die Untersuchung ausgewählten Bestände erfüllen diese Anforderung ausnahmslos. Durch die Beschränkung auf diesen tiefsten Bereich der höheren Berglagen ist nicht von nennenswerten Wachstums- und Qualitätsunterschieden im Vergleich zu den Flächen der mittleren Berglagen auszugehen.

Die derzeitige forstliche Klimagliederung – an der sich auch die Flächenauswahl orientierte – ist ein statisches System, das auf Daten über Jahresmitteltemperatur und Niederschlagssummen der Klimaperiode 1901–1950 aufbaut (GEMBALLA & SCHLUTOW 2007; PROFFT ET AL. 2007; FRISCHBIER ET AL. 2011). Aufgrund der nachweisbaren klimatischen Veränderung, vor allem der jahreszeitlichen Verschiebung der Niederschläge (IRRGANG 2002; IPCC 2013), besitzen Jahresmittelwerte jedoch nur eine geringe Aussagekraft hinsichtlich des Pflanzenwachstums. Die tatsächlich wachstumsrelevanten Klimagrößen werden dadurch nicht mehr befriedigend abgebildet, was eine Aktualisierung der forstlichen Klimagliederung erforderlich macht (GEMBALLA & SCHLUTOW 2007; PROFFT ET AL. 2007). Namentlich in den mittleren und höheren Mittelgebirgslagen ist eine deutliche positive Abweichung der realen Temperaturwerte von den Basiswerten der forstlichen Klimagliederung erkennbar (GEMBALLA & SCHLUTOW 2007; PROFFT ET AL. 2007). Vor diesem Hintergrund ist die Erweiterung des Untersuchungsgebiets auf die höheren Berglagen wenig kritisch zu sehen.

### Bodenwasserhaushalt

Auch hinsichtlich der Wasserversorgung der Standorte mussten die anfänglichen Vorgaben zwangsweise gelockert werden. Zunächst wurden ausschließlich Buchenvoranbauten auf terrestrischen Standorten von mittlerer bis ziemlich armer Nährkraft und mäßig frischem Wasserhaushalt angestrebt. Der daraus gewonnene Flächenumfang erfüllte die Anforderungen der Untersuchung jedoch nicht. Folglich mussten auch Bestände auf von Staunässe beeinflussten Standorten einbezogen werden.

Während in Thüringen und auch im sächsischen Forstbezirk Eibenstock ausnahmslos terrestrische Standorte vorlagen, waren insgesamt sechs der Flächen im Zellwald sowie im Tharandter Wald durch ein wechselfeuchtes Bodenklima charakterisiert. Dies betraf fast ausnahmslos Bestände, in denen der Fichtenschirm durch KYRILL geworfen wurde. Dies erscheint vor dem Hintergrund der vielfach nachgewiesenen Instabilität von Fichtenbeständen auf wechselfeuchten/staunassen Standorten plausibel. Die Fichte ist nicht in der Lage, derartige Böden tiefgründig zu durchwurzeln (MITSCHERLICH 1970; HANSEN & SPIECKER 2005), was eine stark erhöhte Disposition gegenüber Windwurf zur Folge hat (DOBBERTIN 2002; SCHINDLER ET AL. 2009; SCHMIDT ET AL. 2010). Zugleich zeigt dieser Zustand aber, dass der Untersuchungsgegenstand auch für diesen Standortbereich von großer Bedeutung ist.

Ungeachtet dessen ist die Inhomogenität der Standortsverhältnisse hinsichtlich Wachstum und Qualität nicht unbedenklich. Optimale Entwicklungsbedingungen findet die Buche auf tiefgründigen, basen- und nährstoffreichen sowie gut durchlüfteten Böden mit frischem bis mäßig frischem Wasserhaushalt (LEIBUNDGUT 1984; OTTO 1994). Ausgeprägte Staunässe oder starke Trockenheit hingegen hemmen ihre Vitalität deutlich und sorgen für natürliche Grenzbereiche des Buchenvorkommens (LEIBUNDGUT 1984; OTTO 1994; NIINEMETS & VALLADERES 2006). Demzufolge ist auch in der vorliegenden Arbeit nicht grundsätzlich auszuschließen, dass die Voranbauten auf wechselfeuchten Standorten im Vergleich zu denen auf terrestrischen Standorten eine verminderte Vitalität und Qualität aufweisen. Diese Vermutung wird durch SAGHEB-TALEBI (1996) gestützt, welcher eine signifikante Beziehung zwischen Basensättigung sowie Wasserversorgung und der Entwicklung junger Buchen aufzeigte. Auf Standorten mit mittlerer Trophie und frischem Wasserhaushalt stellte er das vitalste Wachstum sowie die beste Qualitätsentwicklung fest. MARVIE-MOHADJER (1975) untersuchte 100- bis 120-jährige Buchenbestände entlang eines Standortgradienten. Analog zu den zuvor geschilderten Ergebnissen waren auf den besten Standorten auch die höchsten

Qualitäten vorzufinden. Dazu erklärt LANGHAUSEN (2009), dass namentlich das standortspezifische Höhenwachstum die Astreinigung und somit die Qualität der Buche bestimmt. KURTH (1946) hingegen betont, dass standortabhängige Qualitätsunterschiede in Altbeständen zwar erkennbar sind, diese jedoch im Dickungsstadium kaum zutage treten, da hier vorrangig die intraspezifische Konkurrenz die Entwicklung bestimmt. KLEIN (1983) kommt zu einer ähnlichen Schlussfolgerung. Die aktuelle Waldentwicklungstypenrichtlinie für den Landeswald Sachsens berücksichtigt diese Erkenntnisse, indem die Buche als Hauptbaumart dort nur auf terrestrischen Standorten mit langfristig anhaltendem Grundwasseranschluss vorgesehen ist. Als Mischbaumart kann sie zudem auf Substraten mit mindestens anlehmigem Oberboden oder anderen den Bodenwasserhaushalt begünstigenden Eigenschaften eingebracht werden (EISENHAUER & SONNEMANN 2009; SACHSENFORST 2013b).

Diese Erkenntnisse bekräftigen zunächst die ursprünglich vorgesehene Begrenzung der Untersuchung auf terrestrische, mäßig nährstoff- und wasserversorgte Standorte. Die unumgängliche Berücksichtigung wechselfeuchter Standorte ist mit Blick auf die in der Literatur geschilderte Standort-Wachstum-Interaktion auch hinsichtlich der Qualität durchaus kritisch zu betrachten. Sie ist allein durch die erheblichen Schwierigkeiten bei der Flächensuche zu rechtfertigen. Die Problematik wird in der Gesamtbetrachtung der Arbeit jedoch etwas relativiert, da nur sechs der insgesamt 29 untersuchten Voranbauten auf von Staunässe beeinflussten Arealen stocken. Um dadurch möglicherweise hervorgerufene Störeffekte bei der Datenanalyse und Interpretation berücksichtigen zu können, wurde die Versuchsfläche stets als zufälliger Effekt in das gemischte Modell integriert. So konnten flächen- und damit auch standortspezifische Streuungen berücksichtigt und ihr Einfluss auf Wachstum und Qualität im Gesamtmodell korrigiert werden.

### **6.1.2 Herkunft des Pflanzenmaterials**

An das beim Buchenvoranbau verwendete Vermehrungsgut wurden eingangs keine expliziten Anforderungen gestellt. Die einzige Restriktion bestand darin, dass dieses in der Herkunftsempfehlung für den Einsatz im jeweiligen Gebiet vorgesehen sein sollte. Die nachträgliche Recherche dieser Herkunftsangaben bereitete erhebliche Schwierigkeiten, die vor allem daraus resultierten, dass die untersuchten Voranbauten bereits 12–26 Jahre alt waren. Seit ihrer Etablierung haben sich die Forstadressen der Bestände und die Zuständigkeiten auf Revier- oder gar Forstamtsebene oft mehrfach geändert. Eine

Rückverfolgung bis zum Zeitpunkt der Pflanzung verlief nicht für alle Voranbauten erfolgreich. Zudem existierten die Revierbücher mit den Vollzugsdaten einiger Flächen nicht mehr. Im Zuge der Digitalisierung und Umadressierung der Daten wurden die Herkunftsangaben zudem oft nicht berücksichtigt. Doch selbst für jüngere Voranbauten fehlten in den digitalen Datenbanken nicht selten die betreffenden Herkunftsinformationen, da diese in der Vergangenheit offenbar nicht konsequent vermerkt wurden. Insgesamt konnten dadurch nur für 18 der 29 Versuchsflächen die Herkunftsgebiete des Buchenpflanzguts nachvollzogen werden.

Doch selbst bei Voranbauten, für die im Datenbanksystem eine Herkunftsschlüsselnummer hinterlegt war, brachte die eindeutige Bestimmung der sich dahinter verbergenden Herkunft oft Schwierigkeiten mit sich. Ursächlich dafür war die mehrfache Überarbeitung der gesetzlichen Rahmenbedingungen seit den 1990er-Jahren, wodurch sich auch die Bezeichnungen und Schlüsselnummern der Herkunftsgebiete mehrmals änderten (vgl. BMELF 1994). Eine korrekte Identifikation der im Vollzug gebuchten Herkunft war also nur unter der Annahme gegeben, dass diese stets konform mit der jeweils gültigen Verordnung umgeschrieben und korrekt in die Datenbank übertragen wurde (WOLF 2015). Dass teilweise unplausible Angaben vorzufinden waren, spricht für Fehler während der Umstellungsprozesse. Die insgesamt sehr unbefriedigende Datenlage belegt, dass die Herkunftswahl als zentrale Grundlage angepasster sowie anpassungsfähiger Wälder und einer zukunftsorientierten Waldwirtschaft (vgl. MAYER 1992; BURSCHEL & HUSS 2003; WOLF 2008; MUCK ET AL. 2009; FRISCHBIER ET AL. 2014) leider nur sehr lückenhaft dokumentiert ist.

Neben den fehlenden Angaben ist vor allem die Verwendung von Vermehrungsgut des Herkunftsgebiets 81017 „Württembergisch-Fränkisches Hügelland“ auf drei Versuchsflächen der Modellregion Sächsisches Erzgebirge kritisch zu sehen. Dieses wurde zu keinem Zeitpunkt für den Gebrauch im genannten Gebiet empfohlen (WOLF 2015). Die Buche gehört zu jenen Baumarten, die ein sehr großes natürliches Verbreitungsgebiet und ein dementsprechend hohes genetisches Potenzial besitzen. Innerhalb des Gesamtareals bestehen jedoch erhebliche klimatische Unterschiede, sodass sich im Lauf der Evolution standortspezifische Variationsmuster, sogenannte Herkünfte, Provenienzen oder Standortrassen, herausbildeten (LEIBUNDGUT 1982; ENESCU & MUHS 1988; OTTO 1994; MUCK ET AL. 2009). Für die vorliegende Untersuchung ist dies insofern von Bedeutung, als sich Herkünfte in ihrer Phänologie, namentlich den Zeitpunkten von Austrieb und Abschluss

der Wachstumsperiode, oft erheblich voneinander unterscheiden (THOMASIU & GÄRTNER 1988; CHMURA & ROZKOWSKI 2002; NIELSEN & JORGENSEN 2003). Der Austriebszeitpunkt weist wiederum einen engen Zusammenhang mit der Anfälligkeit gegenüber Spätfrostschäden auf (BROWN 1952; CHMURA & ROZKOWSKI 2002; HUBER ET AL. 2011; FISICHELLI ET AL. 2014). Beispielsweise kann eine zehntägige Verschiebung des Austriebs das Risiko von Spätfrostschäden um 50 % senken (TEISSIER ET AL. 1988). Letztere wurden in früheren Untersuchungen als maßgebliche Ursache der Zwieselbildung nachgewiesen (vgl. KERR & BOSWELL 2001; NINGRE & COLIN 2007), sodass früh austreibende Herkünfte anfälliger für derartige Qualitätsverluste sind (THOMASIU & GÄRTNER 1988). Zudem bestehen auch hinsichtlich der Toleranz gegenüber Klimaextremen, speziell Trockenstress, deutliche Variationen zwischen den einzelnen Buchenherkünften (TOGNETTI ET AL. 1995; WOLF 2008, 2011). Dies wirkt sich insbesondere auf das Zuwachsverhalten nach Trockenjahren aus (THOMASIU & GÄRTNER 1988; WOLF 2008).

Die Ergebnisse vorangegangener Arbeiten deuten darauf hin, dass einige Qualitätsmerkmale der Buche nicht nur indirekt durch die Umweltbedingungen gesteuert werden, sondern zumindest in einem gewissen Maß direkt genetisch fixiert sind. Beispielsweise geben MUCK ET AL. (2009) an, dass Schaftform und Zwieselbildung zu etwa 60 % genetisch verankert sind. Auch HANSEN ET AL. (2003) konnten eine erhebliche Variation von Geradschaftigkeit, Drehwuchs und durchgehender Schaftlänge bei europäischen Buchenherkünften aufzeigen. Nach HEUKAMP (1999) ist die Qualität hauptsächlich eine Frage der Herkunft, sodass hohe Bestandesdichten eine veranlagte Zwieselbildung nur vorübergehend unterdrücken können. Andere Autoren gehen dagegen nicht von einer starken genetischen Steuerung der Qualität, sondern einem primären Effekt der Bestandesdichte (Umwelteinfluss) aus (vgl. KLEIN 1983; RICHTER 1999; LEDER & WEIHS 2000). Zudem werden Provenienz-Umwelt-Interaktionen beschrieben, welche eine pauschale Festlegung der besten Herkunft verbieten (vgl. DUPRÉ ET AL. 1986). Die Hauptbemühungen im Rahmen der Qualitätsverbesserung sollten demzufolge auf der Verwendung hochwertiger Herkünfte und geeigneter waldbaulicher Methoden, z. B. hoher Pflanzendichte und Schirmdruck bei der Verjüngung, liegen (TEISSIER ET AL. 1988).

Dieser Überblick belegt, dass nicht standortangepasste Herkünfte im Hinblick auf die Vitalität und Qualität der Buchen durchaus kritisch einzuschätzen sind. Für die hier untersuchten Voranbauten lagen lediglich Angaben zum Herkunftsgebiet, nicht jedoch dem Erntebestand des Vermehrungsguts vor (WOLF 2015). Aus diesem Grund sind keine Rückschlüsse auf die qualitativen Erbanlagen der jungen Buchen in den einzelnen Flächen möglich. Somit kann

auch nicht zwangsläufig davon ausgegangen werden, dass die im Untersuchungsgebiet vorgefundene, jedoch laut Herkunftsempfehlung nicht zugelassene südwestdeutsche Herkunft 81017 schlechtere Qualitäten liefert als für diese Standorte empfohlene Provenienzen. Wesentlich bedeutender ist in diesem Zusammenhang, dass die Herkünfte aufgrund ihrer ökologischen Prägung möglicherweise unterschiedlich gut mit den Umweltbedingungen im Untersuchungsgebiet zurechtkommen. Dennoch ist nicht anzunehmen, dass das grundsätzliche Reaktionsverhalten der Buchen infolge ihrer plötzlichen Freistellung dadurch beeinträchtigt wurde. Dieses ist vorrangig durch ihre Eigenschaft als typische Schattbaumart (vgl. NIINEMETS & VALLADERES 2006; EWALD 2007; JARCUSKA 2009) mit hoher morphologischer Plastizität (vgl. STANCIOIU & O'HARA 2006a; BARBEITO ET AL. 2014) und weniger durch die Herkunftsprägung zu erklären. Letztere bestimmt bestenfalls das Ausmaß einer Zuwachsreaktion oder die Intensität von Qualitätsverlusten, z. B. als Folge einer unterschiedlichen Phänologie und Spätfrostsensitivität. Insofern sind die teilweise ungeklärte Herkunftsfrage sowie die Einbeziehung nicht empfohlener Herkünfte in diese Arbeit zweifelsfrei nicht als optimal zu bewerten, eine grundlegende Beeinträchtigung der dargestellten Ergebnisse ist aber dennoch höchst unwahrscheinlich.

### **6.1.3 Rasterbasiertes Probekreisverfahren**

Angesichts der äußerst heterogenen Verhältnisse auf den KYRILL-Sturmflächen erfolgte die Etablierung der Aufnahmeeinheiten auf der Basis eines regelmäßigen, quadratischen Rasters im Abstand von 20 m bzw. 30 m. Grundsätzlich haben Verfahren dieser Art den Vorteil, dass subjektive Einflüsse bei der Wahl der Stichprobenpunkte ausgeschlossen werden, da deren Position von vornherein durch die Rasterweite bestimmt ist (AMMER ET AL. 2004). Die systematische Verteilung über die gesamte Untersuchungsfläche erhöht darüber hinaus die Repräsentativität der Ergebnisse und ist organisatorisch einfacher umzusetzen als eine Zufallsauswahl (BÖRNER ET AL. 2003). In der vorliegenden Arbeit wurde ein stratifiziertes Stichprobenverfahren angewendet. Da aus dem Prozess der Flächenvorauswahl bereits Informationen zu Überschirmungssituation und Entwicklungsstadium der Voranbauten vorlagen, konnten anhand dieser Faktoren homogene Gruppen (sogenannte Straten) gebildet werden (vgl. AMMER ET AL. 2004; HEDDERICH & SACHS 2012). Diese Vorstratifizierung erhöhte die Effizienz des Erhebungsverfahrens, weil jederzeit ein Überblick über die Anzahl der Stichprobenpunkte eines Stratum gegeben ist. Da ein möglichst ausgeglichener Stichprobenumfang zwischen den Straten angestrebt wurde, half dieses Vorgehen dabei, eine eventuell erforderliche Verdichtung des Rasters frühzeitig zu erkennen und umzusetzen. Die



stratifizierte Stichprobe hat weiterhin den maßgeblichen Vorteil, dass der für die Straten geschätzte Mittelwert sowie der sich daraus ergebende Mittelwert der Grundgesamtheit mit geringeren Fehlern behaftet sind als bei einer unstratifizierten Stichprobe (BORTZ 1993; AMMER ET AL. 2004).

Andere Autoren arbeiteten bei der Qualitätsbeurteilung bzw. Bilanzierung von Buchenkulturen auf Windwurfflächen ebenfalls mit Rasterweiten zwischen 20 m und 40 m sowie Probekreisflächen von 20 m<sup>2</sup> (vgl. OTT 2001; OTT ET AL. 2003; OTT & LÜPKE 2006). LEONHARDT (2005) hingegen empfiehlt für flächenrepräsentative Qualitätsuntersuchungen in ausgesprochen heterogenen Buchenvoranbauten ein wesentlich engeres Raster von 6 m x 8 m. Sie verwendete ebenfalls kreisförmige Probeflächen mit einem Radius von 2,52 m. Diesbezüglich ergänzen OTT & LÜPKE (2006), dass mindestens 20 regelmäßig über den Bestand verteilte Probepunkte nötig sind, um zuverlässige, flächenpräzise Aussagen treffen zu können. Aufgrund der hohen Flächenanzahl, der mit bis zu 5,5 ha teils erheblichen Größe einzelner Voranbauten sowie der umfangreichen Qualitätserhebungen am Einzelbaum war ein derart intensives Stichprobenverfahren in der vorliegenden Arbeit nicht umsetzbar. Dies war aber auch nicht erforderlich, da das Anliegen dieser Untersuchung nicht darin bestand, flächenspezifische Aussagen zu treffen. Vielmehr zielt das gewählte Versuchsdesign darauf ab, typische Bestandessituationen in Buchenvoranbauten unterschiedlicher Pflanzendichte, Entwicklungsstufe und Überschirmungssituation zu identifizieren und die unter diesen Gegebenheiten ablaufenden Wachstums- und Qualitätsentwicklungen differenziert zu skizzieren. Durch dieses Vorgehen können generelle Zustandsbeschreibungen und Handlungsempfehlungen für diverse, jedoch klar voneinander abgrenzbare Bestandessituationen erstellt werden. Hierdurch soll die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die Praxis erleichtert werden. Eine Mindestanzahl von Probepunkten je untersuchtem Voranbau war in dieser Arbeit somit nicht erforderlich.

Für die vorliegende Untersuchung besteht der wesentliche Vorteil des rasterbasierten Probekreisverfahrens vor allem im Vorliegen kartesischer Koordinaten für jeden einzelnen Rasterpunkt, die sich aus der GIS- bzw. GPS-gestützten Planung und Etablierung des Rasters ergaben und für die statistische Modellbildung nach den Verfahren der LMM und GLMM von hohem Wert waren. Denn auf der Grundlage dieser Koordinaten war es problemlos möglich, die Unabhängigkeit der Modellfehler von der räumlichen Distanz zwischen den Probekreisen einer Versuchsfläche zu prüfen (vgl. HAMM ET AL. 2014) und gegebenenfalls mittels spezifischer Korrelationsstrukturen in der Modellkonstruktion zu berücksichtigen (PINHEIRO

& BATES 2000). Die Kombination aus rasterbasiertem Probekreisverfahren inklusive exakter Koordinaten für jeden Rasterpunkt und den statistischen Methoden gemischter Modelle erwies sich als vorteilhaft und kann daher nur empfohlen werden.

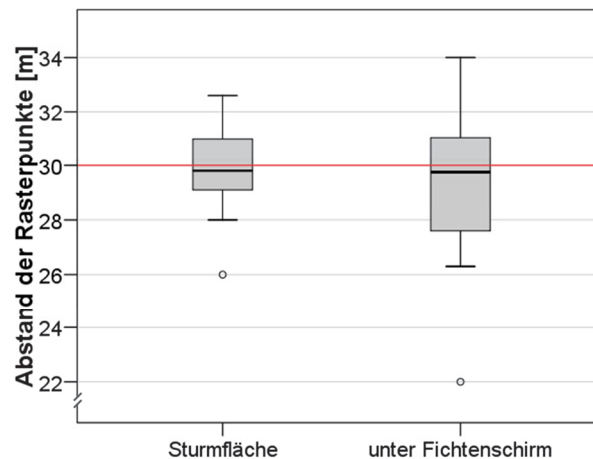
Positive Erfahrungen wurden mit der Größe der Probekreise gemacht. Ein Radius von 2,52 m ermöglicht einerseits die Etablierung solcher Plots auch in kleineren Voranbauelementen oder bei engen Rückegassenabständen, ohne durch unerwünschte Randeffekte beeinträchtigt zu werden. Andererseits war es selbst in äußerst heterogenen Buchenvoranbauten möglich, in sich homogene Bereiche mit einer Fläche von 20 m<sup>2</sup> auszuweisen. Diesbezüglich bestätigt auch LEONHARDT (2005) unter Berufung auf LOETSCH ET AL. (1973), dass ein Probekreisradius von 2,52 m den besten Kompromiss zwischen Repräsentativität, Schätzgenauigkeit und Erhebungssaufwand bei Qualitätsaufnahmen in Buchenvoranbauten darstellt.

Im vorliegenden Fall verlief die Etablierung des Probekreisrasters trotz der genannten Vorteile nicht ganz problemlos. Die Planung des Rasters erfolgte zunächst am Schreibtisch mithilfe der Forstgrundkarte und eines Orthofotos im GIS. Da zu diesem Zeitpunkt keinerlei Informationen über die exakte räumliche Lage der Voranbauelemente vorlagen – nur selten war der gesamte Bestand vorangebaut –, wurde zunächst die ganze Bestandesfläche, oft sogar die Teilfläche mit dem Raster bedeckt. Nur vereinzelt war es bei freigestellten Voranbauten möglich, auf Basis des Orthofotos verjüngte Bereiche von Bereichen ohne Buchenvoranbau zu trennen. Dadurch ergab sich eingangs eine sehr große Anzahl potenzieller Plots. Im Gelände sah die Situation dann bedeutend anders aus. Aufgrund der ungenauen Digitalisierung der Bestände und Waldstraßen lagen viele Punkte außerhalb der eigentlichen Flächen. Weiterhin bedingten eng und oft ungeordnet verlaufende Rückegassen, dass viele Punkte ausfielen. Um den Arbeitsaufwand zu verringern, wird für zukünftige rasterbasierte Untersuchungen eine vorherige GPS-gestützte Verortung der Verjüngungselemente und Rückegassen, beispielsweise im Zuge der Flächenvorauswahl, empfohlen.

#### GPS-gestützte Messung im Wald

Aufgrund der unübersichtlichen Situation in den Beständen erfolgte die Etablierung des Probekreisrasters nicht wie üblich mittels Bussole, Maßband und Fluchtstangen (vgl. LEONHARDT 2005; OTT & LÜPKE 2006), sondern GPS-gestützt. Die Anwendung von GPS im Wald wird mit dem Argument der mangelnden Genauigkeit oft infrage gestellt (vgl. NAUMANN ET AL. 2004). Vor diesem Hintergrund wurden auf allen Flächen der Modellregion

Thüringen sowie der sächsischen Forstbezirke Eibenstock und Bärenfels stichprobenweise Kontrollmessungen des 30-m-Rasters vorgenommen. Dazu wurde in jeweils drei nicht direkt aneinander grenzenden Rasterzellen jeder Fläche der Abstand zweier Punkte mittels Maßband kontrolliert. Die Ergebnisse können Abbildung 37 entnommen werden, getrennt nach freigestellten und überschirmten Voranbauflächen. Demnach kann von einer mangelnden Präzision der GPS-Anwendung im Wald im vorliegenden Fall nicht die Rede sein. Mit 29,80 m auf der Freifläche bzw. 29,32 m unter Fichtenschirm liegen die mittleren Abstände der Rasterpunkte nur knapp unter dem Sollwert von 30 m. Erstaunlich ist jedoch, dass offenbar kaum überschirmungsabhängige Unterschiede bestehen. Wenngleich die Standardabweichung unter Fichtenschirm ( $SD = 2,50$  m) etwas größer ist als auf der Freifläche ( $SD = 1,55$  m), kann unabhängig vom Vorhandensein des Schirms eine insgesamt hohe Genauigkeit konstatiert werden.



**Abbildung 37:** Ergebnisse der Kontrollmessung des 30-m-Rasters auf den Versuchsflächen. Die Darstellung erfolgt getrennt für Flächen ohne bzw. mit Fichtenschirm.

Die eigenen Ergebnisse folgen damit den Erkenntnissen früherer Arbeiten, wonach selbst unter Schirm und bei bewegtem Relief genaue Positionsbestimmungen mittels GPS im Wald möglich sind (ZIMMERMANN 1997; NAUMANN ET AL. 2004). Die von einem preisgünstigen GPS-Gerät, wie es in der vorliegenden Arbeit verwendet wurde, zu erwartende Genauigkeit lag bisher im Bereich von  $\pm 10$  m (HOLUBA ET AL. 2004; STÄHLI & KELLER 2013). Dieser Wert wurde hier deutlich übertroffen. Analog dazu bestätigten auch STÄHLI & KELLER (2013) durch Messungen in Waldgebieten der Schweiz, dass es nach dem heutigen technischen Stand selbst mit Low-Cost-GPS gelingt, mittlere Positionsabweichungen von unter 2 m zu erreichen. Der primäre Zweck dieser Rastermethode bestand in der möglichst objektiven Verteilung der Stichprobenpunkte auf die Versuchsflächen, wofür die erzielte Präzision völlig

ausreichend war. Die Methode der GPS-gestützten Rasteranlage kann folglich als überaus zufriedenstellend eingestuft und für zukünftige Arbeiten empfohlen werden.

#### **6.1.4 Erhebung der Pflanzendichte im Voranbau**

Wenn in der vorliegenden Arbeit von der Pflanzenzahl pro Hektar im Voranbau die Rede ist, so ist darunter die Ausgangspflanzenzahl abzüglich aller Ausfälle der ersten Jahre zu verstehen. Ursächlich für diese Herangehensweise ist, dass die Pflanzendichte als Indikator der standraumabhängigen, intraspezifischen Konkurrenz dient. Alle Buchen, die innerhalb weniger Jahre nach der Pflanzung abstarben, hatten niemals Einfluss auf dieses Konkurrenzgefüge und wurden darum auch nicht mit einbezogen. In dieser Untersuchung wurde folglich jene Pflanzendichte erfasst, welche die Konkurrenzsituation im Voranbau tatsächlich langfristig prägte. Dadurch waren engere Zusammenhänge mit den Wachstums- und Qualitätsparametern zu erwarten als bei der Verwendung der reinen Ausgangspflanzenzahl. Gegen deren Einsatz sprach außerdem, dass für einige Voranbauten überhaupt keine entsprechenden Angaben bzw. Informationen zum Pflanzverband vorlagen. Oftmals stimmten diese auch nicht mit den vorgefundenen Bestandesbedingungen überein. Nicht selten wurden zunächst fehlgeschlagene Voranbauten nachgebessert, was ebenfalls kaum nachvollziehbar war. Vor allem aber verbot die lange Standzeit der Voranbauten eine zuverlässige Rekonstruktion der ursprünglichen Pflanzenzahl anhand des Pflanzverbands.

Aufgrund von abweichenden Pflanzverbänden oder Ausfällen variiert die kleinräumige Verteilung der Buchen innerhalb eines Voranbaus oft erheblich, und zwar umso ausgeprägter, je geringer die mittlere Pflanzenzahl pro Flächeneinheit ist (OTT & LÜPKE 2006). Speziell bei Pflanzungen unter Schirm sind die Verbandsweiten aufgrund des Vorhandenseins von Altbäumen sowie Stubben sehr unterschiedlich (vgl. TIEBEL 2014). Auf Bestandesebene gemittelte Pflanzenzahlen waren für die vorliegende Fragestellung folglich nicht präzise genug, da sie die kleinräumige Variation der Bestandesdichte und damit der intraspezifischen Konkurrenz nicht widerspiegeln. Aus diesem Grund wurde die Pflanzenzahl für jeden Probekreis separat ermittelt und schließlich auf Hektarwerte hochgerechnet. Diese probekreisspezifische Pflanzendichte gibt die Konkurrenzsituation der darin befindlichen Einzelbäume sehr viel genauer wieder. Hierbei wurden auch abgestorbene Individuen einbezogen, sofern sie eindeutig der intraspezifischen Konkurrenz erlegen oder erst kürzlich infolge des Sturmwurfs des Fichtenschirms abgestorben waren. Diese Bäume haben die

Konkurrenzsituation im Voranbau über eine lange Phase des Bestandeslebens mitbestimmt und waren darum unbedingt zu berücksichtigen.

Für die praktische Umsetzung der hier erarbeiteten Pflanzenzahlempfehlung resultiert aus der geschilderten Methode der Pflanzendichteerfassung jedoch, dass bei der Begründung von Buchenvoranbauten eine zusätzliche Ausfallreserve einkalkuliert werden muss. Nur so ist mit einiger Sicherheit zu gewährleisten, dass die zur Wertholzproduktion in der Qualifizierungsphase erforderliche Bestandesdichte letzten Endes tatsächlich erreicht wird. Wie hoch diese Reserve anzusetzen ist, hängt von sehr vielen Faktoren ab und kann standörtlich stark variieren. Der örtliche Wirtschaftler sollte sie darum auf der Basis seiner Erfahrungen festlegen. Frühere Untersuchungen belegen, dass allgemeingültige Empfehlungen dahingehend kaum möglich sind. BERGERS ET AL. (2006) geben mittlere Ausfallraten von 7,7–10,7 % innerhalb der ersten fünf Vegetationsperioden an. Dagegen fielen in den von WAGNER & MÜLLER-USING (1997) untersuchten Voranbauten bereits im ersten Jahr 19,1 % aller Buchen aus. Noch höhere Verluste beschreibt LÜPKE (1987), welcher nach acht Jahren Ausfälle von 36–59 % der Ausgangspflanzenzahl ermittelte. Pauschale Angaben zur notwendigen Pflanzenzahlreserve in Buchenvoranbauten verbieten sich demzufolge.

Dies begründet sich vor allem darin, dass der Umfang der Ausfälle im Kulturstadium von sehr vielen, zum Teil kaum beeinflussbaren Faktoren abhängt. An erster Stelle dürften hier die Qualität des Pflanzenmaterials und dessen Einbringung, die Bodeneigenschaften, aber auch klimatische Einflüsse sowie Wildverbiss zu nennen sein (BURSCHEL ET AL. 1985; BURSCHEL & HUSS 2003; EL KATEB ET AL. 2009). Daneben wirkt eine intensive Bodenvegetation als Ressourcenkonkurrent um Licht sowie Wasser und bietet Mäusen einen optimalen Lebensraum, was oft empfindliche Verluste zur Folge hat (BURSCHEL & SCHMALTZ 1965b; LÜPKE 1987; RÖHRIG ET AL. 2006). Ebenso spielt die Intensität der Altholzüberschirmung eine entscheidende Rolle. Während sich eine moderate Überschirmung positiv auf den Anwuchserfolg und die frühe Entwicklung der Buchen auswirkt (BERGERS ET AL. 2006), treten unter sehr dichtem Schirm häufig erhebliche Ausfälle auf (BURSCHEL ET AL. 1985; EL KATEB ET AL. 2009). Diesbezüglich konnte HERTRAMPF (2009) nachweisen, dass die Ausfallrate in den ersten neun Jahren nach der Pflanzung von 5 % auf über 40 % steigt, wenn der Überschirmungsgrad von 40–50 % auf mehr als 70 % zunimmt. Dies ist neben der deutlich verminderten Strahlungszufuhr vor allem auf die vom Fichtenschirm ausgehende Altholzwurzelkonkurrenz zurückzuführen (AMMER 2000; MATJAZ & PRIMOZ 2010; PETRITAN

ET AL. 2011). Demzufolge hängen das Überleben und die Entwicklung der Buchen in den ersten Jahren nach der Begründung vorrangig von interspezifischen Faktoren ab (HERTRAMPF 2009), während die Pflanzendichte des Voranbaus in diesem Zusammenhangs anfangs offenbar irrelevant ist (BURSCHEL & HUSS 2003; HOUSKOVA & MAUER 2013).

Von besonderer Bedeutung ist, dass der größte Teil dieser Ausfälle innerhalb weniger Jahre nach der Pflanzung eintritt (vgl. BRUNNER & HUSS 1994; WAGNER & MÜLLER-USING 1997). Anhand von Bilanzierungen von Freiflächenkulturen konnten OTT (2001) belegen, dass die stärksten Ausfälle in den ersten beiden Vegetationsperioden nach der Begründung auftreten. Danach geht der jährliche Ausfallanteil merklich zurück, sodass ab einem Alter von 8–10 Jahren kaum noch mit weiteren Verlusten zu rechnen ist (OTT 2001). Dieses Resultat stimmt ziemlich genau mit den Beobachtungen überein, die HERTRAMPF (2009) an Buchenvoranbauten unter Fichtenschirm machte. Schlussendlich unterstützen die geschilderten Zusammenhänge das für die vorliegende Arbeit gewählte Vorgehen zur Erhebung der Pflanzendichte. Da Ausfälle schwerpunktmäßig in den ersten Jahren eintreten und durch Faktoren verursacht werden, die später weder nachvollziehbar sind, noch zum Gegenstand der vorliegenden Untersuchung gehören, erscheint deren Vernachlässigung zweckmäßig. Dadurch erfolgt eine Konzentration auf das waldbaulich tatsächlich relevante Pflanzenkollektiv eines Voranbaus. Zugleich wird die Übertragbarkeit der erzielten Ergebnisse und daraus abgeleiteten Handlungsempfehlungen auf die Praxis erleichtert. Letzteres gilt namentlich mit Blick auf die starke Variation der Ausfallquote, welche pauschale Angaben zur erforderlichen Reserve und damit zur Pflanzenzahl bei der Begründung von Buchenvoranbauten verbietet.

## **6.2 Gesamthafte Interpretation der Ergebnisse**

### **6.2.1 Plastizität der Buche und Folgen für die Qualität**

Die vorliegende Untersuchung konnte sehr deutlich aufzeigen, welche Folgen eine plötzliche Freistellung zunächst überschirmter Buchen für deren Wachstumsreaktion hat und wie sich diese auf wirtschaftlich relevante Qualitätsmerkmale auswirken. Um die hier dargestellten Reaktionsmuster der Buche richtig verstehen und einordnen zu können, ist ein Blick auf deren Verjüngungsökologie und Strategie zur anschließenden Kronenraumeroberung in Naturwäldern unerlässlich. WAGNER ET AL. (2010) erklären in diesem Zusammenhang, dass in natürlichen Wäldern mit führender Buche vor allem kleine Kronendachlücken auftreten, die von der Buche zur Verjüngung genutzt werden. Untersuchungen von MEYER &

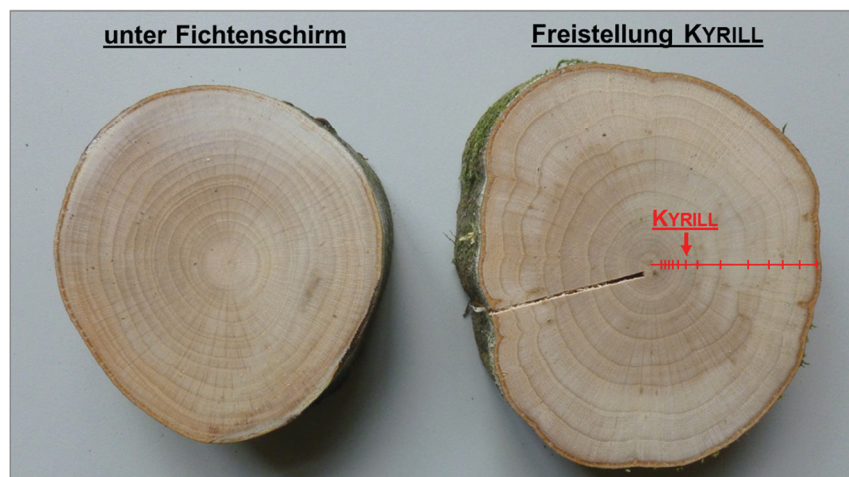


ACKERMANN (2004) sowie ZEIBIG ET AL. (2005) zufolge gehen diese meist auf das Ausfallen einzelner Altbäume zurück, sodass Lückengrößen bis 50 m<sup>2</sup> am häufigsten auftreten. Störungen größerer Ausdehnung sind vergleichsweise selten. Immer wieder, etwa in Zeitintervallen einer Baumgeneration, treten aber auch in Buchenwäldern mittelgroße Windwurfereignisse auf. Diese verursachen Bestandeslücken von bis zu 1.500 m<sup>2</sup> und spielen eine nicht zu vernachlässigende Rolle in der Entwicklungsdynamik der betreffenden Waldökosysteme (NAGEL & DIACI 2006). Grundsätzlich ist die Buche als typische Schattbaumart aber an lange Verjüngungszeiträume und eine langfristig schützende Überschirmung angepasst (WAGNER ET AL. 2010). Dies wird auch beim waldbaulichen Umgang mit der Baumart berücksichtigt, weshalb deren künstliche Verjüngung im Rahmen des Waldumbaus heutzutage nahezu ausschließlich als Voranbau unter dem Schutz des Altholzschirms erfolgt (vgl. LEONHARDT & WAGNER 2006; WAGNER ET AL. 2010). Abrupt eintretende, großflächige und dauerhafte Störungen, wie sie infolge des Schirmverlusts durch den Orkan KYRILL zustande kamen, verursachen hingegen kahlschlagsähnliche Rahmenbedingungen (vgl. CARLSON & GROOT 1997; AUSSENAC 2000), welche im starken Gegensatz zur natürlichen Verjüngungsökologie der Schattbaumart Buche stehen. Den vorliegenden Ergebnissen ist jedoch zu entnehmen, dass die Buche auch mit diesen Gegebenheiten sehr gut umgehen kann. Die plastische Zuwachsreaktion nach der Freistellung und die über die gesamte Beobachtungsperiode hinweg signifikant größere Wachstumsleistung auf Sturmflächen belegen, dass das vitalste Wachstum offenbar auch bei der Schattbaumart Buche unter Freiflächenbedingungen geleistet wird. Zumindest für die hier untersuchten Altersstufen Jungwuchs bis Jungbestand ist diese Erkenntnis sicher abzuleiten. Dies gilt zum einen für das Höhenwachstum (vgl. BURSCHEL ET AL. 1985; BRUNNER & HUSS 1994), zum anderen in noch deutlicherem Maß für das Durchmesserwachstum (vgl. CAO 2001; COLLET ET AL. 2002; AMMER 2003; KÄTZEL ET AL. 2004). In Übereinstimmung mit früheren Arbeiten führt das vitale, ungebremste Wachstum aber zugleich zu einer ausgesprochen negativen Qualitätsentwicklung der Buchen auf Freiflächen (BROWN 1952; LE TACON 1985; OTT ET AL. 2003).

Grundsätzlich ist die Wachstumsstrategie schattentoleranter Baumarten auf ein moderates, jedoch selbst unter Beschattung kontinuierlich stattfindendes Jugendwachstum ausgerichtet. Dagegen bleibt die Intensität der Höhenzuwachssteigerung nach stärkerer Freistellung deutlich hinter jener lichtbedürftigerer Baumarten zurück (CANHAM 1988, 1989; POULSON & PLATT 1989; VALLADERES & NIINEMETS 2008). Die Fähigkeit, selbst bei stark reduziertem

Strahlungsangebot noch ein gewisses Wachstum zu leisten, verschafft der Buche Konkurrenzvorteile gegenüber weniger schattentoleranten Arten. Hierfür verfügt sie über zahlreiche Anpassungsstrategien, namentlich auf Ebene der Kronenmorphologie, welche eine effiziente Strahlungsaufnahme und ein ressourcenschonendes Wachstum im Schatten erlauben (CANHAM 1988; CAO 2001; KUNSTLER ET AL. 2005; STANCIOIU & O'HARA 2006a; VALLADERES & NIINEMETS 2008; COLLET ET AL. 2011; BARBEITO ET AL. 2014). Diese enorme morphologische Plastizität ist charakteristisch für Baumarten, die dem Architekturmodell von TROLL folgen (ROLOFF 1986; MATYSSEK ET AL. 2010). Aufgrund der für Buchenwälder typischen Lückendynamik erfährt die Buche wiederholt wechselnde Phasen der Lückenbildung und Beschattung, bis es ihr gelingt, endgültig in das obere Kronendach hineinzuwachsen (CANHAM 1989; COLLET ET AL. 2008). Ein hohes Reaktionsvermögen ist die Grundvoraussetzung dafür, die zeitlich eng begrenzten Kronendachlücken ausnutzen zu können, bevor sie von benachbarten Altbäumen wieder geschlossen werden. Im Gegensatz zu Lichtbaumarten investiert die Buche das verbesserte Ressourcenangebot aber weniger in eine Maximierung des Höhenwachstums, sondern vielmehr in eine horizontale Wuchsraumeroberung in Form des Kronenausbaus (CANHAM 1988; POULSON & PLATT 1989). Auf diesem Weg kann die Buche lichtbedürftigere Baumarten überwachsen und ausdunkeln, sodass diese der Konkurrenz der Buche im Bestandesschatten unterliegen. Auch in den eigenen Ergebnissen wird diese Wachstumsstrategie der Buche erkennbar. Die Bäume reagierten nach der Freistellung mit einem moderaten Anstieg des Höhenwachstums, dafür aber einem massiven Ausbau des Dickenwachstums von Stamm und Ästen sowie einer Aufrichtung der Äste (steile Astwinkel). Im Einklang mit früheren Untersuchungen belegen die eigenen Erkenntnisse, dass das Höhenwachstum von allen Wachstumsgrößen am wenigsten von der Strahlung gesteuert wird, da es die maßgebliche Größe im Konkurrenzkampf um Licht darstellt und somit bereits unter moderater Beschattung auf relativ hohem Niveau verläuft (CANHAM 1988, 1990; AMMER 2000; WEIHS & KLAENE 2000; PETRITAN ET AL. 2010). Dagegen ist vor allem das vermehrte Auftreten starker Äste und Zwiesel ein Beweis für den forcierten Kronenausbau infolge der sturmbedingten Freistellung. Beachtenswert ist aber, dass die mehrfach skizzierte Änderung der Kronenmorphologie innerhalb von nur sechs Vegetationsperioden erfolgte. Die aus waldbaulicher Sicht in der Regel hoch geschätzte Plastizität der Buche wirkt sich im Fall einer unplanmäßigen, plötzlichen Freistellung im Jungwuchs- und Dickungsstadium demnach ausgesprochen nachteilig auf die Qualitätsentwicklung und folglich das Produktionsziel Buchenwertholz aus.

Die Fähigkeit, im Wachstum zügig „umzusetzen“ und so auf eine plötzlich erhöhte Ressourcenversorgung zu reagieren, ist ein bei Schattbaumarten bekanntes Phänomen, welches auch waldbaulich ausgenutzt wird. So ist aus Plenterwäldern bekannt, dass namentlich die äußerst schattentolerante Weißtanne (*Abies alba* MILL.) über die Eigenschaft verfügt, ihr Wachstum selbst nach sehr langen Unterdrückungsphasen innerhalb von nur 1–2 Jahren nach einer Freistellung zu reaktivieren, als wäre dieses niemals unterdrückt gewesen (LEIBUNDGUT 1984; SCHÜTZ 2001). In ähnlicher Weise vermag auch die Buche lange Beschattungsphasen zu überdauern und auf eine Freistellung umgehend mit verstärktem Wachstum zu reagieren, ohne dass sich die schlechten Ausgangsbedingungen im Zuwachsniveau widerspiegeln (DEBELJAK & MLINSEK 1998; COLLET & CHENOST 2006; JARCUSKA 2009). Ausdrücklich gilt dies für die Dynamik des Durchmesserwachstums sowie den Kronenausbau (DEBELJAK & MLINSEK 1998). Dabei ist die Dauer der vorangegangenen Überschirmungsperiode nur von untergeordneter Bedeutung für die Zuwachsreaktion nach der Freistellung. Bei Schattbaumarten bleibt die Fähigkeit zur dynamischen Zuwachssteigerung folglich bis ins hohe Alter bestehen (LEIBUNDGUT 1984; DEBELJAK & MLINSEK 1998; SCHÜTZ 2001). Erkennbar ist der plötzliche Umschwung an der abrupt endenden Engringzone auf der Stammscheibe (AMMON 1995; SCHÜTZ 2001). Die hier untersuchten Buchen hatten unter dem aufgelichteten Fichtenschirm bereits recht gute Ausgangsbedingungen. Umso erstaunlicher ist der deutliche, unverzügerte Anstieg des Durchmesserwachstums an Stamm und Ästen im Jahr der sturmbedingten Freistellung (Abbildung 38).



**Abbildung 38:** Stammscheiben zweier Buchen. Links: dauerhaft überschirmte Buche mit gleichmäßigem Jahrringbau. Rechts: sturmbedingt freigestellte Buche mit deutlich erkennbarem, sofortigem und intensivem Anstieg der Jahrringbreite.

Daran wird eindrucksvoll erkennbar, dass die Buche stets in der Lage ist, eine Verbesserung der Umweltbedingungen in verstärktes Wachstum umzusetzen. Gemäß ihrer natürlichen Anlagen ist sie darauf ausgerichtet, solche Chancen für sich zu nutzen. Im Gegensatz zu

naturnahen, kleinräumigen Kronendachlücken, welche nur eine moderate Steigerung der Strahlungsbedingungen bewirken und zudem von begrenzter Dauer sind, setzt ein großflächiger Schirmverlust derart viele Ressourcen frei, dass die Buche die Möglichkeit bekommt, ihre Krone stark zu erweitern. Das dauerhaft hohe Ressourcenangebot bewirkt ein unkontrolliertes Wachstum, welches vor allem dem horizontalen Ausbau der Krone zur Standraumeroberung dient und auf Kosten der Apikaldominanz und somit der Qualität geht (ROLOFF 1986; LEDER & HILLEBRAND 2001; SHAHNAVAZI ET AL. 2005).

Besonders deutlich wird die Wachstumsstrategie der Buche anhand eines Vergleichs mit Baumarten anderer ökologischer Prägung. Sehr eindrücklich zeigt dies die Arbeit von POULSON & PLATT (1989), welche das Zuwachsverhalten von miteinander vergesellschafteten Laubbaumarten unterschiedlicher Schattentoleranz in Bestandeslücken (800 m<sup>2</sup>) ostamerikanischer Mischwälder untersuchten. Während die zentralen und folglich am stärksten mit Strahlung versorgten Lückenbereiche durch die Lichtbaumarten *Fraxinus americana* L. und *Liriodendron tulipifera* MILL. dominiert wurden, konnten *Acer saccharum* MARSH. und vor allem *Fagus grandifolia* ERH. an den beschatteten Lückenrändern den Konkurrenzkampf für sich entscheiden. Erklärt wird dies damit, dass die Buche im Gegensatz zu den Lichtbaumarten *Fraxinus americana* L. und *Liriodendron tulipifera* MILL. am wenigsten dazu in der Lage ist, ihr Höhenwachstum nach einer kompletten Freistellung schnell und intensiv zu steigern. Dafür leistet sie im Halbschatten das größte Höhenwachstum, baut die horizontale Wuchsraumerschließung stärker als alle anderen Arten aus und profitiert so von ihrer Konkurrenzstärke sowie ihrer morphologischen Plastizität, um lichtbedürftigere Arten zu überwachsen und auszudunkeln (POULSON & PLATT 1989). In Übereinstimmung damit fand CANHAM (1990) heraus, dass *Fagus grandifolia* ERH. unter Schirm ein höheres Höhenwachstum aufweist als *Acer saccharum* MARSH. In größeren Bestandeslücken kehrte sich die Situation hingegen um. Der Konkurrenzvorteil der Buche liegt also eindeutig in Bestandesstrukturen, welche durch kleinflächige Störungen charakterisiert sind (CANHAM 1989). Da die Buche bereits von sehr kleinen Kronendachlücken profitiert, erfährt sie deutlich weniger und kürzere Phasen des unterdrückten Wachstums im Schatten, als dies beispielsweise beim Ahorn der Fall ist. Infolgedessen gelingt es ihr wesentlich schneller, in das obere Kronendach hineinzuwachsen (CANHAM 1990). CAQUET ET AL. (2010) verglichen das Höhen- und Durchmesserwachstum europäischer Ahornarten mit dem der Buche. Alle Arten reagierten zügig auf die Freistellung, wobei der Anstieg des Durchmesserwachstums identisch war. Im Ausbau des

Höhenwachstums jedoch blieb die Buche deutlich hinter den Ahornarten zurück (CAQUET ET AL. 2010). Demzufolge ist die Intensität der Höhenzuwachssteigerung, mit der eine Art auf neu entstandene Kronendachlücken reagiert, negativ mit ihrer Schattentoleranz korreliert (POULSON & PLATT 1989). Wie generell alle Schattbaumarten verfügt auch die Buche vorrangig über Mechanismen, mit deren Hilfe sie sich an eine effiziente Strahlungsaufnahme in langen Beschattungsphasen anpassen kann. Dies setzt vor allem eine hohe morphologische Plastizität voraus. Lichtbaumarten besitzen dagegen hauptsächlich Strategien zur Wachstumsmaximierung bei uneingeschränkter Strahlungsversorgung, was durch eine hohe physiologische und anatomische Plastizität gewährleistet wird (VALLADERES ET AL. 2002).

Die hohe morphologische Plastizität der Buche äußert sich weiterhin in einer äußerst erfolgreichen Strategie zur Raumbesetzung. So verfügt sie hinsichtlich der Reaktion auf waldbauliche Eingriffe und das Schließen entstandener Kronendachlücken über außerordentliche Fähigkeiten (SCHÜTZ 2001). Untersuchungen in Fichten-Buchen-Mischbeständen ergaben, dass die Buche bei identischem Biomassezuwachs einen um 57 % höheren Zuwachs der Kronengrundfläche und ein um 127 % größeres Höhenwachstum leistet als die Fichte (PRETZSCH 2005; PRETZSCH & SCHÜTZE 2005). Die Buche ist in der Raumbesetzung und lateralen Raumeroberung also wesentlich effizienter als die Fichte. Unter stabilen Umweltbedingungen hingegen ist die Fichte durch ihr schnelleres Höhenwachstum in der vertikalen Erschließung neuen Wuchsraums deutlich überlegen. Die Erfolgsstrategie der Buche beruht auf der perfekten Standraumausnutzung und -besetzung, sodass sie Störungslücken durch eine laterale Expansion der Krone zügig schließt, bevor andere Arten überhaupt in der Lage sind, dies zu tun (POULSON & PLATT 1989; PRETZSCH 2005; PRETZSCH & SCHÜTZE 2005). Darüber hinaus verfügt die Buche über eine enorme Konkurrenzkraft im Kronenraum. Im Zuge eines Vergleichs von Buchen-Fichten-Mischbeständen mit entsprechenden Reinbeständen in Südbayern stellten PRETZSCH & SCHÜTZE (2009) fest, dass der auf die Fichte wirkende Konkurrenzdruck in einer Mischung mit Buche erheblich höher ist als im Reinbestand, während bei der Buche das Gegenteil zu beobachten war. Aufgrund des Konkurrenzungleichgewichts kommt die typische Strategie der lateralen Kronenerweiterung und effizienten Raumbesetzung der Buche hier deutlicher zum Vorschein als im Reinbestand (PRETZSCH & SCHÜTZE 2009). Weiterhin ergaben Analysen in Mischbeständen aus Buche und Eiche, dass Erstere stets große Kronen mit nur geringer Exzentrizität und Deformationserscheinung zeigt. Bei der Eiche wurde hingegen eine wesentlich stärkere Kronenverschiebung und -deformation festgestellt, was als Indiz für ihre



Unterlegenheit im Konkurrenzkampf um Wuchsraum zu interpretieren ist (LONGUETAUD ET AL. 2013). Für Mischbestände lässt sich daraus eine positive Korrelation zwischen Schattentoleranz und interspezifischer Konkurrenzkraft im Kronenraum, jedoch eine negative Beziehung zwischen Schattentoleranz und Kronenplastizität ableiten (LONGUETAUD ET AL. 2013). Dem begegnen SCHRÖTER ET AL. (2011) mit Untersuchungen in Buchenreinbeständen. Sie stellten eine hohe morphologische Plastizität der Buchenkrone fest, welche sich in Kronenverlagerungen sowie -verformungen äußert. Diese Mechanismen dienen vorrangig der Reduktion der intraspezifischen Konkurrenz und einer optimalen Ausnutzung des begrenzten Kronenraums (SCHRÖTER ET AL. 2011).

Die enorme Konkurrenzkraft der Buche und ihr starkes Bestreben einer effizienten Ausnutzung des verfügbaren Wuchsraums finden sich auch in den eigenen Ergebnissen wieder. Speziell das Durchmesserwachstum und die horizontale Kronenexpansion (Astwachstum, Zwieselbildung) weisen eine positive Korrelation mit dem mittleren Standraum einer Buche auf. Die intraspezifische Konkurrenz hat aufgrund der Plastizität der Buchenkrone (vgl. PRETZSCH & SCHÜTZE 2009; SCHRÖTER ET AL. 2011) eine enorme Bedeutung für die Kronenform (vgl. BARBEITO ET AL. 2014) und folglich die Qualität der Buchen. Der Ausbildung qualitätsmindernder Kronenmerkmale kann gemäß den vorliegenden Resultaten selbst im Fall einer sturmbedingten Freistellung durch hohe Pflanzendichten in gewissem Umfang entgegengewirkt werden. Zugleich legen die Arbeiten von PRETZSCH & SCHÜTZE (2009) sowie LONGUETAUD ET AL. (2013) jedoch den Schluss nahe, dass diese Qualifizierung einzig durch intraspezifische Konkurrenz erfolgen kann. Offensichtlich ist keine andere Baumart in der Lage, der Konkurrenz der Buche standzuhalten und deren Qualifizierung im erforderlichen Umfang zu leisten. Von lichtbedürftigeren Mischbaumarten (z. B. Fichte, Kiefer, Lärche, Birke), welche sich nach Sturmwurfereignissen oft üppig in den freigestellten Buchenvoranbauten ansamen, ist dahingehend kaum eine pflegende Wirkung zu erwarten.

Insgesamt bestätigen die vorliegenden Erkenntnisse erneut, dass die Buche eine äußerst plastische und adaptive Baumart ist. Sie besitzt außerordentliche Fähigkeiten hinsichtlich der Anpassung an starke Beschattung, ist aber zugleich in der Lage, unverzüglich von einer plötzlichen Ressourcenerhöhung zu profitieren. Diese Kombination aus hoher Schattentoleranz und enormer Reaktionsfreudigkeit macht sie im naturnahen Waldbau zu einer hoch geschätzten Baumart. Doch genau diese Plastizität ist auch verantwortlich für den aufgezeigten, unaufhaltbaren Qualitätsverlust, welcher infolge einer plötzlichen Freistellung



im Jungwuchs- und Dickungsstadium eintritt. Mit Blick auf die natürliche Verjüngungsökologie, vor allem aber die Produktionsziele für Buchenbestände sollten moderne Bewirtschaftungsmethoden kleinflächige Lichtstellungen bevorzugen. Diese ermöglichen ein vitales Höhenwachstum der vorangebauten Buchen, unterbinden aber zugleich das ungebremste, qualitätsmindernde Astwachstum (CANHAM 1988; SHAHNAVAZI ET AL. 2005; WAGNER ET AL. 2010).

### **6.2.2 Funktions- oder Nachhaltumbau?**

Nach wie vor steht auf einer großen Fläche der Waldumbau von Nadelholzreinbeständen auf typischen Buchenstandorten bevor (vgl. WAGNER & HENKEL 1993; FRISCHBIER ET AL. 2014; WEIDIG ET AL. 2015). Grundsätzlich ist die Notwendigkeit eines Waldumbaus immer dann gegeben, wenn die Ziele des Waldbesitzers mit der derzeitigen Bestockung nicht zu realisieren sind. Im Umkehrschluss bedeutet dies aber zugleich, dass ein Waldumbau nur dann Sinn macht, wenn er mit hoher Wahrscheinlichkeit zur zukünftig besseren Zielerreichung beiträgt (HANSEN & SPIECKER 2005). Vor diesem Hintergrund legen die hier vorgestellten Ergebnisse den Schluss nahe, die Praxis des Buchenvoranbaus vor allem hinsichtlich der damit verbundenen (Produktions-)Ziele stärker als bisher einer standort- und risikoabhängigen Differenzierung zu unterziehen. Ein solches Zielsystem muss sich schließlich auch in der Intensität und damit den finanziellen Aufwendungen für einen Waldumbau mittels Buchenvoranbau niederschlagen. Ein potenzielles Konzept zur rationalen und zielorientierten Differenzierung von Waldumbaumaßnahmen wurde von WAGNER (2007) eingeführt, indem er in Anlehnung an Überlegungen von FUJIMORI (2001) zwischen „Funktionsumbau“ und „Nachhaltumbau“ unterscheidet.

Unter *Funktionsumbau* wird demnach ein auf die bessere Erfüllung aktueller Funktionen ausgerichteter Waldumbau verstanden (WAGNER 2007). Er strebt nach dem Kompromiss zwischen sich ändernden standörtlichen Rahmenbedingungen (Klimawandel) und bestehenden Ansprüchen an den Wald (WAGNER 2008). Dabei wird grundsätzlich eine konkrete Struktur-Funktions-Beziehung vorausgesetzt (WAGNER 2007). Die hier untersuchten Buchenvoranbauten wurden mit dem expliziten Ziel der Buchenwertholzproduktion zur Ablösung bzw. Durchmischung großflächiger Fichtenreinbestände angelegt (vgl. EISENHAUER ET AL. 2005; ECKARDT & ARENHÖVEL 2006; EISENHAUER & SONNEMANN 2008; SACHSENFORST 2013b). Gemäß den eigenen Forschungsergebnissen liegen die „funktionsoptimalen Strukturen“ (vgl. WAGNER 2008) für diese Zielsetzung ausschließlich

dann vor, wenn neben einer ausreichend hohen Pflanzenzahl (mindestens 6.000–8.000 St./ha) zugleich eine langfristig stabile Überschirmung durch den Fichtenaltbestand gewährleistet ist. Darüber hinaus sollten die Verjüngungseinheiten mindestens Horst-, besser sogar Kleinbestandsgröße haben. So wird der durch Randeffekte beeinflusste Flächenanteil gering gehalten (IRRGANG 1996; MATTHES 1997; WAGNER 2007; HUTH & WAGNER 2013; TIEBEL 2014). Im sächsischen Staatswald beispielsweise ist die künstliche Einbringung der Buche in Fichtenbestände darum in Verjüngungseinheiten von mindestens 0,3–0,5 ha vorgesehen (EISENHAUER 2008; SACHSENFORST 2013b). Für wertholzorientierte Buchenvoranbauten sind also enorme Investitionen zu tätigen. Sie sollten zukünftig auf Standortbereiche mit hoher Wahrscheinlichkeit der Zielerreichung begrenzt bleiben. Analog dazu empfehlen HANSEN & SPIECKER (2005), Waldumbaumaßnahmen ganz bewusst nur dort umzusetzen, wo die anvisierten Ziele bzw. Funktionen mit hoher Sicherheit auch erreicht werden. Wie die eigenen Ergebnisse zeigen, muss in diese Bewertung vor allem die Stabilität der umzubauenden Fichtenbestände einfließen. Bereits angerissene, durchbrochene oder schlecht gepflegte und folglich instabile Fichtenforste scheiden für Buchenvoranbauten mit dem Produktionsziel Wertholz grundsätzlich aus. Ähnliches gilt für Bestände auf wechselfeuchten Standorten. Fichtenbestände auf terrestrischen, gut wasserversorgten Standorten, in windgeschützten Lagen und namentlich solche, die im Zuge wiederholter stabilisierender Durchforstungen (vgl. LEIBUNDGUT 1969; MITSCHERLICH 1974; SCHÜTZ ET AL. 2006; HÖLLERL & MOSANDL 2009) langfristig auf einen Voranbau vorbereitet wurden, bieten dagegen optimale Ausgangsbedingungen. In solchen Situationen darf dann aber beim Voranbau keinesfalls geegizt werden; stattdessen muss durch hohe Pflanzenzahlen und mindestens horstgroße Verjüngungselemente konsequent der Weg zum wertholzhaltigen Buchen(-Fichten)-Bestand eingeschlagen werden.

Aus ökonomischem Blickwinkel wirft diese Empfehlung allerdings die Frage auf, ob ein Baumartenwechsel von Fichte zu Buche auf ebendiesen „sicheren“ Standorten überhaupt sinnvoll und notwendig erscheint. Solange die derzeitige Fichtenbestockung eine nur geringe Prädisposition gegenüber Sturm und Borkenkäfer aufweist, werden die meisten Betriebe wohl kaum über eine Bucheneinbringung nachdenken (vgl. NEUMANN & KETTERER 2015). Dies gilt vor allem, weil die zum Fichtenanbau geeigneten Standorte mit Voranschreiten des Klimawandels ohnehin massiv abnehmen (IRRGANG 2002; PROFFT ET AL. 2007; KÖLLING ET AL. 2009; FRISCHBIER ET AL. 2010). Aktuelle Analysen für Norddeutschland belegen, dass ein Rückgang der Nadelbaumarten in naher Zukunft unaufhaltbar scheint (vgl. SPELLMANN ET AL.

2015). Die Ursache wird im seit 25 Jahren praktizierten und vorrangig an den ökologischen Ansprüchen der Buche orientierten naturnahen Waldbau gesehen, welcher eine aus wirtschaftlicher Sicht nachhaltige Verjüngung der Nadelbaumarten vernachlässigt (SPELLMANN ET AL. 2015). Zumindest fällt eine Argumentation für die zuvor geschilderte Strategie aufgrund des derzeit florierenden Nadelholzmarkts und einer im Vergleich dazu bescheidenen Ertragslage der Buchenwirtschaft schwer (vgl. MÖHRING 2004; SPELLMANN 2005; SPELLMANN ET AL. 2015). Seitens einzelner Forstökonomien wird die vor allem von staatlichen Forstbetrieben forcierte Laubholzmehrung mit Verweis auf den überragenden wirtschaftlichen und sozioökonomischen Stellenwert des Nadelholzes deshalb neuerdings sogar als „Laubholzirrweg“ diskreditiert (vgl. MANTAU 2015). Dennoch ist der Autor der vorliegenden Untersuchung der Auffassung, dass die aktuelle Marktlage in Wirtschaftszweigen wie der Forstwirtschaft, die von sehr langen Produktionszeiträumen geprägt sind, nur eines von vielen Kriterien für die Baumartenwahl sein darf. Ein weiterer, keinesfalls zu vernachlässigender Aspekt ist die Baumartenausstattung auf der Ebene des Teil- bzw. Gesamtbetriebs und deren Standortgerechtigkeit. Dahingehende Überlegungen sind der „Fichtenrichtlinie“ der Bayerischen Staatsforsten zu entnehmen (vgl. BAYERISCHE STAATSFORSTEN 2009). Diese sieht für ausdrücklich stabile, risikoarme Fichtenstandorte eine Beteiligung von mindestens 30 % Laubholz (vor allem Buche) in der folgenden Bestandesgeneration vor. Fehlen Naturverjüngungspotenziale, ist ein Voranbau mit Buche (oder Tanne) vorzunehmen. Als Produktionsziel wird mindestens B-Qualität im Buchenerdstammstück erwartet (BAYERISCHE STAATSFORSTEN 2009). Die Standortregion der Sächsischen und Thüringischen Mittelgebirge sowie auch deren vorgelagerte Hügelländer werden von Fichtenreinbeständen auf potenziell natürlichen Buchenwaldstandorten dominiert (vgl. SCHWANECKE 1990; THOMASIUS 1990; GEROLD 1996). Beispielsweise nimmt die Fichte im Thüringer Forstamt Oberhof einen Flächenanteil von 76 % ein. Im sächsischen Forstbezirk Eibenstock sind es trotz über 20-jähriger intensiver Waldumbauaktivität immer noch 85 % (SCHUSSER 2009). Angesichts dieser monotonen Rahmenbedingungen leuchtet die Notwendigkeit einer Erweiterung des Baumarten- und Produktportfolios durch Laubholzaneicherung auch aus ökonomischer Sicht zweifellos ein. Gerade unter den unsicheren Bedingungen der Klimawandelproblematik, aber auch um auf Nachfrageänderungen am Holzmarkt flexibel reagieren zu können, erscheint ein gewisser Laubholzanteil, darunter möglichst Wertholz, vorteilhaft. Daher muss beim Waldumbau Fichten-dominierter Betriebe eine klare Prioritätensetzung auf Ebene der Einzelfläche erfolgen (WAGNER 2004). Aus allen umzubauenden bzw. mit Laubholz anzureichernden

Fichtenbeständen sollten gezielt nur jene mit geringem bis mittlerem Kalamitätsrisiko für einen wertholzorientierten, das heißt stammzahlreichen und großflächigen Buchenvoranbau (Funktionsumbau) ausgewählt werden (WEIDIG ET AL. 2015). Eine solche flächenscharfe Differenzierung trägt zugleich zur Rationalisierung der Waldumbaumaßnahmen auf Betriebsebene bei (WAGNER 2004).

Aus Sicht vieler Forstbetriebe sind aber gerade vorgeschädigte, instabile und durch funktionale Risiken belastete Fichtenbestände vordringlich umzubauen, da dort die Produktionssicherheit schon heute nicht mehr gegeben ist (vgl. EISENHAUER ET AL. 2005; EISENHAUER 2008; EISENHAUER & SONNEMANN 2008; BAYERISCHE STAATSFORSTEN 2009; THÜRINGENFORST 2015b). Aufgrund des sehr hohen Risikos eines vorzeitigen, unplanmäßigen Schirmverlusts bieten diese Bestände jedoch keine geeigneten Ausgangsbedingungen für einen wertholzorientierten Buchenvoranbau. Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung weisen darauf hin, dass von solchen Vorhaben künftig unbedingt Abstand genommen werden sollte. Nach einem Schirmverlust ist das Wertholzziel selbst bei sehr hohen Pflanzendichten im Voranbau nicht realisierbar, sodass die hierfür zu tätigenden Investitionen ungerechtfertigt wären. Daher müssen für solche Bestände andere als die oben geschilderten Waldumbaustrategien eingesetzt werden. Laut WAGNER (2007) sind dies klassische Ausgangssituationen für einen „Nachhaltsumbau“. Diese Form des Waldumbaus ist nicht direkt an eine bestimmte Funktionalität gekoppelt, sondern versucht, der Unsicherheit bezüglich zukünftiger Rahmenbedingungen und Ansprüche an den Wald durch Eröffnung vielfältiger Optionen zu begegnen (WAGNER 2007). Vorrangiges Ziel sind die Steigerung der Resistenz und Resilienz der Waldökosysteme gegenüber Störungen und damit eine höhere Flexibilität der Waldbewirtschaftung (WAGNER 2004, 2008). Demzufolge orientiert sich dieser Waldumbau an den Kriterien der nachhaltigen Waldbewirtschaftung, wie sie durch die zweite Ministerkonferenz zum Schutz der Wälder in Europa (Helsinki 1993) definiert wurden (vgl. MCPFE 1993). Elementare Teilziele sind der Erhalt bzw. die Verbesserung von Standortproduktivität, Verjüngungsfähigkeit, Biodiversität und Vitalität der Wälder (WAGNER 2008).

In den großflächigen Fichtenreinbeständen der Mittelgebirge fehlen Mutterbäume der standortheimischen Buche heute weitgehend (FRISCHBIER ET AL. 2014). Primäres Ziel der Bucheneinbringung muss deshalb die Schaffung von Naturverjüngungspotenzialen für die Zukunft sein. Deshalb kann bereits durch eine extensive und folglich kostengünstige Bucheneinbringung (Mischungskomponente) ein wesentlicher Schritt in diese Richtung getan

werden (WAGNER 2007, 2008). Geschieht dies über Voranbau, können sowohl die Aggregatgröße als auch die Pflanzenzahl pro Flächeneinheit deutlich niedriger angesetzt werden als bei wertholzorientierten Buchenvoranbauten. Der intraspezifischen Konkurrenz und damit der Qualifizierung wird in diesem Fall keine Bedeutung beigemessen. Dementsprechend geringer fallen auch die erforderlichen Investitionen und die damit verbundenen betriebswirtschaftlichen Risiken im Fall eines frühzeitigen Schirmverlusts aus. Zu beachten ist jedoch, dass die Buche als schwersamige Baumart ein äußerst geringes Ausbreitungspotenzial besitzt. Die barochore Verbreitung der Bucheckern bleibt so auf einen Umkreis von oft nicht mehr als 20 m um den Mutterbaum begrenzt (RIBBENS ET AL. 1994; WAGNER ET AL. 2010). Über zoochore Vektoren sind zwar größere Distanzen möglich, eine ausreichende Verjüngungsdichte ist durch diese ungerichtete Verbreitung aber wohl kaum sicherzustellen. Die Buche muss deshalb in gewissen Mindestanteilen in den Fichtenbeständen präsent sein, um zukünftig bei Katastrophenereignissen umgehend zur Bildung neuer Bestandesstrukturen über Naturverjüngung beitragen zu können (WAGNER 2004, 2008). Ist eine flächige Buchenverjüngung das Ziel, darf die Entfernung zwischen den Verjüngungselementen (Ausbreitungsinitiale) die oben genannte Ausbreitungsdistanz nicht wesentlich überschreiten. Nach Empfehlungen von WAGNER (2007) stellen Buchentrupps im Abstand von 40–50 m hierfür die Obergrenze dar. In aller Regel sind jedoch nicht Buchenreinbestände, sondern Mischbestände aus Buche und Fichte der für die nächste Waldgeneration angestrebte Zielzustand. Das gewünschte Mischungsverhältnis entscheidet dabei über den Umfang der Bucheneinbringung und damit auch über den Abstand zwischen den Verjüngungseinheiten auf Bestandesebene.

Neben der Naturverjüngungsoption bringt ein (Nachhalts-)Umbau von Fichtenreinbeständen zu Fichten-Buchen-Mischbeständen langfristig eine Vielzahl weiterer positiver Effekte mit sich. In einem Überblick über die Argumente und Verfahren zum Umbau von Fichtenbeständen mit Buche kommen AMMER ET AL. (2008a) deshalb zu dem eindeutigen Resümee, dass dieser sowohl ökonomisch als auch ökologisch weiterhin eine sinnvolle Maßnahme darstellt. Auf einige in diesem Kontext wichtige Aspekte wird nachfolgend exemplarisch eingegangen, ohne dabei Anspruch auf Vollständigkeit zu erheben. ROTHE & KREUTZER (1998) analysierten Buchen-Fichten-Mischbestände und stellten dabei kleinräumige Wechselbeziehungen fest. Speziell hinsichtlich Zuwachsleistung, Durchwurzelung, Nährstoffversorgung sowie Bodenzustand waren positive, synergetische Effekte gegenüber Reinbeständen beider Arten nachweisbar. Die Autoren konnten zeigen,

dass der horizontale Wirkungsbereich vieler dieser Mischungseffekte räumlich eng begrenzt ist, da diese an die Überschirmung der jeweiligen Baumart gebunden sind. Intensive Mischungseffekte setzen deshalb die enge Vergesellschaftung von Buche und Fichte voraus. Unter waldbaulichen Gesichtspunkten stellen Mischungsformen im Durchmesser von maximal einer Altbaumlänge deshalb einen geeigneten Kompromiss dar (ROTHE & KREUTZER 1998).

Jüngere Untersuchungen offenbaren zudem wirtschaftlich positive Auswirkungen einer Mischung von Buche und Fichte. Diese ergeben sich zunächst aus einer im Vergleich zu Reinbeständen beider Arten gesteigerten Zuwachsleistung. So geht aus Arbeiten in Südbayern eine um bis zu 59 % höhere Biomasseproduktion von Fichten-Buchen-Mischbeständen gegenüber dem Durchschnittszuwachs benachbarter Reinbestände beider Arten hervor (PRETZSCH & SCHÜTZE 2009). Zu ähnlichen Befunde kamen ROTHE & KREUTZER (1998): Selbst bei Buchenanteilen von 40 % betrug der Zuwachs noch immer rund 90 % eines Fichtenreinbestands. Die Zuwachsleistung von Fichten-Buchen-Mischbeständen ist demnach zwar niedriger als im Fichtenreinbestand, jedoch deutlich größer als bei einem räumlich getrennten Anbau beider Arten (ROTHE & KREUTZER 1998; MÖHRING & WILHELM 2015).

Das aus Sicht vieler Forstbetriebe wohl am schwersten wiegende Argument für die Etablierung von Mischbeständen sind deren höhere Resistenz und Resilienz gegenüber extremen Umwelteinflüssen (vgl. GRIESS & KNOKE 2011; GRIESS ET AL. 2012; PRETZSCH ET AL. 2013; ROESSIGER ET AL. 2013; MÖHRING & WILHELM 2015). Am Beispiel des durch den Sturm LOTHAR in Schweizer Wäldern verursachten Schadbilds konnten SCHÜTZ ET AL. (2006) belegen, dass bereits ein Mischungsanteil von nur 10 % Laubholz die Schadanfälligkeit der Fichtenbestände um mehr als das Dreifache senken kann. Ökonomisch schlägt sich das verminderte Produktionsrisiko wiederum in höheren Reinertragserwartungen der Mischbestände nieder (KNOKE & HAHN 2007; ROESSIGER ET AL. 2013). Mittels bioökonomischer Modellierungen unter Einbeziehung ökologischer Mischungseffekte kamen KNOKE & SEIFERT (2008) daher zu dem Ergebnis, dass der finanzielle Ertrag von Fichten-Buchen-Mischbeständen mit Fichtenanteilen von über 60 % den vergleichbarer Reinbestände deutlich übersteigt. Mithilfe eines ähnlichen Modellansatzes untersuchten GRIESS & KNOKE (2013) die ökonomischen Konsequenzen einer Risiko mindernden Buchenbeimischung in Fichtenbeständen. Von praktischer Relevanz ist dabei vor allem die Erkenntnis, dass bereits geringe Buchenanteile (hier 7 % Buche) in intensiver, gruppenweiser Beimischung erhebliche ökonomische Vorteile mit sich bringen. Damit übereinstimmend wurde für niedersächsische



Bedingungen kürzlich nachgewiesen, dass sich eine gruppenweise Mischung aus Buche und Fichte im Vergleich zu einer bestandesweisen Baumartentrennung überproportional positiv auf den wirtschaftlichen Erfolg auswirkt. Dabei senkt eine geringe Buchenbeimischung den Reinertrag der Bestände nur unbedeutend (MÖHRING & WILHELM 2015). Infolgedessen kann bereits durch geringe Investitionen in eine extensive Bucheneinbringung ein gewichtiger Beitrag zur Steigerung der Produktionssicherheit und Leistungsfähigkeit von Forstbetrieben erbracht werden (GRIESS & KNOKE 2013). Diese Einsicht unterstützt die auf der Basis der eigenen Ergebnisse für risikobehaftete Fichtenbestände empfohlene Strategie des Nachhaltumbaus. Durch einen extensiven, trupp- bis gruppenweisen Buchenvoranbau können die in instabilen Beständen unbedingt erforderlichen ökologischen und ökonomischen Stabilisierungseffekte auf kostengünstigem und effizientem Weg realisiert werden. Dadurch wird die Grundlage für eine perspektivisch größere waldbauliche Freiheit und vor allem Produktionssicherheit geschaffen. Namentlich letztgenannter Aspekt spielt in der heutigen Zeit, die von steigenden wirtschaftlichen Ansprüchen an die Landesforstbetriebe geprägt ist, eine nicht zu vernachlässigende Rolle.

Die Strategie des Nachhaltumbaus hat gegenüber einem wertholzorientierten Funktionsumbau ferner den Vorteil, dass aufgrund des extensiven Vorgehens mit gegebenem Mitteleinsatz (Finanzmittel, Arbeitskräfte) größere Flächen umgebaut werden können. Aus diesem Grund wird das geschilderte Vorgehen für Fichtenbestände mit (sehr) hoher Prädisposition gegenüber Sturm- und Borkenkäferkalamitäten empfohlen. Im untersuchten Standortbereich dürfte dies zukünftig auf den überwiegenden Teil der Fichtenforste zutreffen (vgl. ECKARDT & ARENHÖVEL 2006; PROFFT ET AL. 2007; FRISCHBIER ET AL. 2010; WEIDIG ET AL. 2015). Für die Waldumbauplanung erscheint eine Unterscheidung zwischen stabilen und risikoarmen sowie instabilen und stark risikobehafteten Fichtenbestockungen daher dringend erforderlich. Diese Klassifizierung sollte im Zuge der Forsteinrichtung auf Bestandesebene erfolgen und muss Standort- sowie Bestockungsparameter gleichermaßen einbeziehen. Damit einhergehen muss die Festlegung entsprechend differenzierter Verjüngungs- und Produktionsziele in den Waldbaurichtlinien der Forstbetriebe. Nur so ist das beschriebene Konzept bestandesspezifisch und zielorientiert umsetzbar.

Ähnliche Überlegungen sind den kürzlich überarbeiteten Waldentwicklungstypen für Baden-Württemberg zu entnehmen. Diese sehen standort- und risikoabhängig differenzierte Behandlungskonzepte für Fichtenbestände sowie deren Verjüngung vor (vgl. KOHNLE ET AL. 2014). Auch die „Fichtenrichtlinie“ der Bayerischen Staatsforsten beinhaltet an individuelle

standörtliche Bedingungen und Risiken angepasste Pflege- sowie Verjüngungskonzepte (vgl. BAYERISCHE STAATSFORSTEN 2009). Demnach sind vorrangig labile, risikoreiche Fichtenbestände durch frühzeitige, aktive Laubholzeinbringung umzubauen. Deren Umfang übersteigt die für stabile Standorte vorgesehenen Mischbaumartenanteile deutlich. Entscheidungsgrundlage bildet die Forsteinrichtungsplanung (BAYERISCHE STAATSFORSTEN 2009). Differenzierte Produktionsziele für die vorangebauten Buchen beinhaltet die genannte Richtlinie jedoch nicht, sodass unabhängig von der Stabilität des Fichtenschirms mindestens B-Qualität angestrebt wird (BAYERISCHE STAATSFORSTEN 2009). Im Thüringer Wald machte man sich infolge wiederholter, verheerender Schadereignisse bereits in den 1980er-Jahren Gedanken über Sturm- und Schneebruchgefahrenklassen für Fichtenreinbestände und darauf abgestimmte Behandlungsempfehlungen (vgl. WOHLLEBEN 1990). Die Zuordnung erfolgte in Abhängigkeit vom Standort und der damit verbundenen Häufigkeit und Intensität von Schadereignissen. Die Ausscheidung von Gefährdungszonen war Aufgabe der Forsteinrichtung (WOHLLEBEN 1990). Auch die neue Dienstordnung Waldbau von ThüringenForst (vgl. THÜRINGENFORST 2015b) unterscheidet bewusst zwischen stabilen sowie instabilen, geschädigten Fichtenbeständen im Baumholzstadium und schafft damit die Grundlage für ein risikoorientiertes Planen und Handeln (WEIDIG ET AL. 2015). Explizite Handlungsempfehlungen zum risikoangepassten Waldumbau (Verjüngungsplanung) fehlen bislang aber auch hier. Der Waldumbau im sächsischen Landeswald erfolgt bereits seit 2003 standörtlich differenziert und konzentriert auf der Grundlage einer Risikozonierung, welche in Abhängigkeit vom Risikopotenzial der aktuellen Bestockung und der Intensität der Standortveränderung (Klimawandel) vorgenommen wird (vgl. EISENHAUER 2008). Als Weiterentwicklung dieses Konzepts unterscheidet die aktuelle Richtlinie zu den Waldentwicklungstypen im Landeswald des Freistaats Sachsen (vgl. SACHSENFORST 2013b) hinsichtlich der Ausgangszustände der Waldentwicklung zwischen standortgerechten sowie nicht standortgerechten bzw. standortwidrigen Fichtentypen ( $FI_{\text{Risiko}}$ ). Diese Klassifizierung geschieht anhand des standortspezifischen Zielzustands. Sieht dieser zukünftig keine wirtschaftlich relevanten Fichtenanteile mehr vor, sodass eine erhebliche Diskrepanz zwischen Ist- und Zielzustand besteht, wird der Ausgangszustand als  $FI_{\text{Risiko}}$  eingestuft (SACHSENFORST 2013b). Zusätzlich nimmt die genannte Richtlinie eine Abstufung der Umbaunotwendigkeit von Waldbeständen vor. Als entsprechende Indikatoren werden zuallererst das Widerstandspotenzial gegenüber destruktiv wirkenden Schadfaktoren sowie die Eintrittswahrscheinlichkeit von Störungen herangezogen. Ausgangszustände der Kategorie  $FI_{\text{Risiko}}$  besitzen grundsätzlich eine hohe Umbaudringlichkeit und sind somit

Schwerpunkt investiver Maßnahmen (vgl. SACHSENFORST 2013b). Die sächsische Waldentwicklungstypenrichtlinie bietet damit eine hervorragende Basis, in die das hier erarbeitete Konzept eines standort- und risikodifferenzierten Waldumbaus mittels Buchenvoranbau problemlos zu integrieren wäre. Dennoch ist ein solches Vorgehen weiterhin nicht angedacht; vielmehr bleibt die Einbringung von Laubholz untrennbar mit dem Produktionsziel Wertholz verbunden (EISENHAUER ET AL. 2005; SACHSENFORST 2013b). Infolgedessen scheiden Fichtenbestände mit (sehr) hoher Disposition gegenüber Sturm und Borkenkäferbefall – dies betrifft im Erzgebirge derzeit eine Fläche von ca. 50.000 ha – für einen Buchenvoranbau kategorisch aus (vgl. WEIDIG ET AL. 2015). Gegen einen kleinflächigen, extensiven Buchenvoranbau bei zugleich reduziertem Anspruch an das Produktionsziel spricht nach EISENHAUER in WEIDIG ET AL. (2015), dass solche Flächen unter den derzeitigen Rahmenbedingungen jagdlich kaum beherrschbar sind. Außerdem wird im Fall eines Schirmverlusts ein enormer Pflegeaufwand infolge des wachsenden Konkurrenzdrucks durch Fichtennaturverjüngung befürchtet. Stattdessen wird hinsichtlich der ökologischen Stabilisierung und Aufwertung der weiterhin von Fichte dominierten Zielzustände der Waldentwicklung auf die spontane Ausbreitung von Birke, Eberesche und Buche gesetzt (EISENHAUER 2008; WEIDIG ET AL. 2015). Zumindest was die Buche betrifft, ist aufgrund ihrer sehr eingeschränkten Ausbreitungspotenz jedoch äußerst fraglich, ob dies in einem Umfang gelingen kann, der eine zuverlässige Verjüngung und Waldentwicklung nach Kalamitäten zulässt.

Abschließend ist festzuhalten, dass die aktuellen Waldbaurichtlinien vieler Landesforstbetriebe bereits standort- und risikodifferenzierte Behandlungsstrategien für Fichtenbestände vorsehen. Mit Blick auf die eigenen Forschungsergebnisse wird dringend empfohlen, diese um eine ebenso differenzierte Verjüngungsplanung zu ergänzen. Dies betrifft insbesondere die Praxis des Buchenvoranbaus und die damit einhergehenden Produktionsziele. Vor dem Hintergrund der nach wie vor immensen Fläche umbaudringlicher Fichtenbestände sollte in dieser Empfehlung vor allem eine Rationalisierungschance zur Bewältigung der Mammutaufgabe Waldumbau gesehen werden.

## 7 Schlussfolgerung und Handlungsempfehlungen

Buchenvoranbauten werden seit nunmehr über zwei Jahrzehnten als adäquates Mittel zum Waldumbau von Fichtenreinbeständen zu naturnäheren Mischwäldern praktiziert. Angesichts der zunehmenden Sturmschadensgefährdung der Fichtenschirme sind Überlegungen zum Umgang mit unplanmäßig freigestellten Buchenverjüngungen und möglichen Präventionsmaßnahmen im Sinn eines risikodifferenzierten Waldumbaus zwingend erforderlich. Aus den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit können diesbezüglich einige für den praktischen Waldbau hilfreiche Schlussfolgerungen gezogen werden:

An vorderster Stelle ist die herausragende Bedeutung des Fichtenschirms für den Wachstumsgang und damit einhergehend auch die Qualitätsentwicklung der Buchenvoranbauten anzuführen. Diese Erkenntnis zog sich durch die gesamte Untersuchung, sodass die eingangs bezüglich der Wirkung des Schirmverlusts aufgestellte Hypothese 1 uneingeschränkt anzunehmen ist. Durch den Schirmverlust wurde eine intensive Zuwachssteigerung initiiert, welche vor allem das Durchmesserwachstum der Bäume betraf. Mit Blick auf die Qualität ist dies besonders kritisch zu sehen, zumal eine positive Korrelation zwischen Stamm- und Astzuwachs signifikant nachgewiesen werden konnte. Hoch vitale, zuwachsstarke Buchen haben demnach per se auch stärkere Äste. Diese zunächst anhand von Wachstumsgrößen abgeleitete Erkenntnis konnte durch die anschließende Analyse qualitätsbezogener Astmerkmale untermauert werden. Wachstum bzw. Zuwachsintensität und Qualitätsentwicklung sind demzufolge untrennbar miteinander verbunden. Die Qualitätsparameter der Buchen auf den Referenzflächen bestätigen, dass ein locker-lichter Fichtenschirm als bester Kompromiss zwischen vitalem Wachstum und erwünschter Qualitätsdifferenzierung betrachtet werden kann (vgl. HERTRAMPF 2009; PETRITAN ET AL. 2009). Bei moderater Überschirmung bilden die Buchen weniger und zugleich feinere sowie eher horizontal ausgerichtete Äste aus. All diese Faktoren zeugen von einer höheren Qualität im Vergleich zu Buchen auf Sturmflächen. Der Astreinigungsprozess blieb bisher vom Schirmverlust unbeeinflusst. Diese Feststellung basiert allerdings auf einer Momentaufnahme, welche die verstärkte Bildung starker, steiler Äste infolge der Freistellung noch nicht berücksichtigt. Im hier erfassten astfreien Schaftbereich waren die Äste zum Zeitpunkt des Schirmverlusts bereits abgestorben, zumindest aber stark beschattet und somit in ihrer Vitalität erheblich geschwächt. Perspektivisch ist zu erwarten, dass vor allem die Mortalität, aber auch das Überwallen der durch die Freistellung begünstigten starken Äste erheblich verzögert werden, was sich wiederum negativ auf die Qualität auswirkt.

Die gutachterliche Qualitätsansprache anhand der Schaft- und Kronenform der Buchen stützt das skizzierte Bild zusätzlich. Von allen berücksichtigten Faktoren hat der Schirm den höchsten Stellenwert für die Ausprägung der Kronenform und somit die zukünftige Schaftgüte. Unabhängig von Pflanzendichte und Entwicklungsstadium der Voranbauten bewirkt ein plötzlich und unplanmäßig eintretender Schirmverlust gravierende Qualitätseinbußen der an den Halbschatten adaptierten Buchen. Auf den Sturmflächen waren deshalb hauptsächlich zwieselige Exemplare zu finden. Als Ursache wurde neben verstärkter proleptischer Triebbildung mit entsprechenden Folgeschäden (Frost, Insekten) vor allem das unkontrollierte Wachstum durch die Freistellung vitalisierter, steiler Seitenäste in Erwägung gezogen. Letztere treten dann in Konkurrenz zum Terminaltrieb und führen folglich zur Verzwieselung. Somit wurde die pflegende Wirkung des Halbschattens („edle Halbschattform“) namentlich mit Blick auf die Astigkeit sowie die Kronenmorphologie der Buchen erneut bewiesen (vgl. PETERSEN & WAGNER 1999; AMMER 2000; WEIHS & KLAENE 2000). Infolgedessen konnten zum gegenwärtigen Zeitpunkt unter Fichtenschirm rund sechsmal so viele Z-Baum-Anwärter gezählt werden wie auf den Sturmflächen. Diese Beziehung gilt unabhängig von Pflanzenzahl und Entwicklungsstadium der Voranbauten.

Besondere Beachtung verdient die Tatsache, dass die Buche innerhalb von nur sechs Vegetationsperioden nach dem Schirmverlust in der Lage war, die hier aufgezeigten morphologischen Veränderungen zu erreichen. Sie ist demnach als überaus plastische und adaptive Baumart einzustufen. Die Buche besitzt außerordentliche Fähigkeiten hinsichtlich der Anpassung an starke Beschattung, ist aber zugleich in der Lage, unverzüglich von einer plötzlichen Ressourcenerhöhung zu profitieren. Genau diese Kombination aus hoher Schattentoleranz und enormer Reaktionsfreudigkeit macht sie im naturnahen Waldbau zu einer hoch geschätzten Baumart. Gleichzeitig ist diese Plastizität aber auch die Ursache des aufgezeigten, unaufhaltbaren Qualitätsverlusts, welcher infolge einer plötzlichen Freistellung im Jungwuchs- und Dickungsstadium eintritt. In Bezug auf die mit Buchenbeständen verfolgten Produktionsziele sollten moderne Bewirtschaftungsmethoden kleinräumige Lichtstellungen bevorzugen. Diese ermöglichen ein vitales Höhenwachstum der vorangebauten Buchen, unterbinden aber zugleich das ungebremsste, qualitätsmindernde Astwachstum (CANHAM 1988; SHAHNAVAZI ET AL. 2005; WAGNER ET AL. 2010).

Hinsichtlich der Auswahl von für einen wertholzorientierten Buchenvoranbau geeigneten Fichtenbeständen wird deshalb dringend empfohlen, an erster Stelle deren Stabilitätssituation zu betrachten. Dies betrifft sowohl den Faktor Standort als auch die Waldschutzsituation. Ein

diesbezüglich operationales Vorgehen scheint die bestandsspezifische Beurteilung der Disposition gegenüber Sturm und Borkenkäferbefall im Rahmen der Forsteinrichtung zu sein. Die anschließende Waldumbauplanung kann dann gezielt darauf abgestellt werden (vgl. WEIDIG ET AL. 2015). Ein hohes Sturmwurfisiko muss aber nicht zwangsläufig bedeuten, dass kein Buchenvoranbau erfolgen darf. Auf jeden Fall sollten die Zielsetzung und damit die Intensität des Voranbaus – vorrangig aus betriebswirtschaftlichen Gründen – einer Risikodifferenzierung unterzogen werden. Hierzu wird an das von WAGNER (2007) eingeführte Konzept angeknüpft, welches zwischen Funktions- und Nachhaltsumbau unterscheidet. Nur bei einer vorhandenen Stabilität des Fichtenschirms sollten wertholzorientierte Buchenvoranbauten im Sinn eines Funktionsumbaus angelegt werden. Diese erfordern eine ausreichend hohe Pflanzenzahl und sind folglich mit erheblichen Investitionen verbunden, welche ausschließlich bei hoher Wahrscheinlichkeit der Zielerreichung gerechtfertigt sind. Unter unsicheren Rahmenbedingungen, das heißt einem (sehr) hohen Risiko von Sturm- oder Insektenkalamitäten, sollten andere Ziele als die Buchenwertholzproduktion im Fokus des Waldumbaus stehen. Empfohlen wird hier ein Nachhaltsumbau, welcher primär auf die Stabilisierung und Steigerung der Produktionssicherheit in der nächsten Waldgeneration abzielt. Ein solcher Umbau ist bereits durch extensive und folglich deutlich kostengünstigere Buchenvoranbauten realisierbar.

Weiterhin legen die Ergebnisse den Schluss nahe, dass die meisten Fichtenaltbestände in der Vergangenheit nicht oder nur unzureichend auf ihre heutige Funktion vorbereitet wurden, der unter ihnen heranwachsenden nächsten Waldgeneration einen langfristigen Schirmschutz zu gewähren (vgl. SPELLMANN & WAGNER 1993). In den heute zum Voranbau anstehenden Altbeständen ist dies auch nicht mehr nachzuholen. Diese Situation verdeutlicht nochmals die Notwendigkeit eines bestandesindividuell abgestimmten und risikodifferenzierten Vorgehens beim Buchenvoranbau wie der hier angeratenen Strategie des Funktions- vs. Nachhaltsumbaus. Für die Zukunft leitet sich aus den heute erschwerten Ausgangsbedingungen zugleich die dringende Notwendigkeit des frühzeitigen Beginns stabilisierender Pflegemaßnahmen in der Fichte ab. Dies kann je nach Ausgangssituation auch heißen, dass nicht kostendeckende Eingriffe in Jungbeständen zu tätigen sind (WEBER 2014). Der Einstieg in die besonders wichtige Durchforstungsphase sollte dann spätestens im Alter von 25–30 Jahren geschehen und ist getreu dem altbekannten Motto „früh – mäßig – oft“ zu praktizieren (LEIBUNDGUT 1969; ABETZ 1979; WEBER 2014). Dadurch kann das Windwurfisiko der Bestände deutlich gemindert werden (ROTTMANN 1986; CLASEN ET AL. 2008; HÖLLERL 2009). Mit der



Einbringung der Buche in die Fichtenbestände muss zudem frühzeitig begonnen werden (KÖLLING ET AL. 2009), da das Sturmwurfrisiko mit der Baumhöhe und damit dem Bestandesalter stetig wächst (ABETZ 1979; ROTTMANN 1986; KÖNIG 1995; DOBBERTIN 2002). Eine weitere Chance, das Risiko eines sturmbedingten Schirmverlusts zu senken, liegt deshalb in der Wahl eines an die Wuchsdynamik des Bestandes angepassten (keine Hiebsopfer) möglichst frühen Einbringungszeitpunkts. Dadurch kann die für den Qualifizierungsprozess der Buchen bedeutsame Überschirmungsphase gestreckt werden.

Weniger eindeutig stellten sich die Ergebnisse zum Effekt der Pflanzendichte im Voranbau auf die Qualität freigestellter Buchen dar. Grundsätzlich gilt, dass die intraspezifische Konkurrenz den Effekt des verloren gegangenen Schirmschutzes keinesfalls ersetzen kann, unabhängig davon, wie groß die Pflanzendichte im Voranbau ist. So zeigten selbst die Buchen in den stammzahlreichsten Beständen nach der Freistellung die im Vorfeld beschriebene starke Zuwachsreaktion an Stamm und stärkstem Grünast auf, inklusive der damit einhergehenden Qualitätseinbußen. Dennoch entfalten hohe Stammzahlen im Voranbau auch nach einem Schirmverlust positive Effekte auf die Qualität, wenn auch in deutlich schwächerem Umfang als unter Schirm. Dies gilt beispielsweise für die Astdichte, aber auch den Durchmesser des stärksten Grünasts. Eine herausragende Rolle kommt der Pflanzendichte im Astreinigungsprozess zu. Dieser setzt mit Erreichen des Dickungsschlusses ein und wird dann allein durch die intraspezifische Konkurrenz vorangetrieben. Selbst vom Schirmverlust wurde dieser für die Wertholzerziehung ausschlaggebende Prozess bisher in keiner Weise negativ beeinträchtigt, was mit Blick auf das Produktionsziel zunächst beruhigend ist. Auch der Entstehung stark entwertender Tiefzwiesel kann durch hohe Pflanzenzahlen im Voranbau und dem damit einhergehenden frühzeitigen Dickungsschluss ein Stück weit vorgebeugt werden. Die gutachterliche Qualitätsansprache offenbart jedoch unmissverständlich, dass infolge der Freistellung selbst bei sehr stammzahlreichen Voranbauten massive Verschlechterungen der Schaft- und Kronenformen auftreten. Im diesem Fall reicht die intraspezifische Konkurrenz allein nicht aus, um die Verzwieselung des oberen Kronenbereichs und damit eine Schaftauflösung abzuwenden. Daraus ist das Fazit zu ziehen, dass hohe Pflanzenzahlen freistellungsbedingte Qualitätsverluste mindern, nicht jedoch verhindern. Die eingangs aufgestellte Hypothese 2 ist demzufolge anzunehmen, allerdings mit den geschilderten Einschränkungen. Explizit im hier untersuchten Kontext der sturmbedingten Freistellung bleibt die Pflanzendichte hinsichtlich ihrer Bedeutung für die Buchenqualität deutlich hinter der des Fichtenschirms zurück. Insgesamt sind die Qualitäten

auf den Sturmflächen also selbst bei höchster Bestandesdichte deutlich schlechter als unter Fichtenschirm. In jeder Hinsicht traten die besten Qualitäten bei einer Kombination aus moderater Überschirmung und Pflanzenzahlen von mindestens 6.000–8.000 St./ha auf (vgl. LEDER & WEIHS 2000; HAGEMANN 2005; LEONHARDT & WAGNER 2006). Diese sind als Untergrenze für einen wertholzorientierten Buchenvoranbau (Funktionsumbau) zu verstehen.

Den forstlichen Praktiker interessiert aber weniger die Qualität des Gesamtkollektivs herrschender Bestandesglieder. Ihn dürfte vielmehr die Frage beschäftigen, ob bzw. unter welchen Rahmenbedingungen in sturmbedingt freigestellten Buchenvoranbauten eine ausreichende Anzahl von Z-Baum-Anwärtern, das heißt Individuen, die sehr gute Qualität mit einer hohen soziologischen Stellung vereinen, vorkommt. Erwartungsgemäß ist die Ausbeute solcher Bäume in den freigestellten Beständen weitaus geringer als unter Altholzschirm. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt erfüllen durchschnittlich 20–30 % der Individuen unter Schirm, hingegen gerade einmal 3–5 % der Buchen in freigestellten Voranbauten die Anforderungen an Z-Baum-Anwärter. Daraus resultiert, dass nach dem derzeitigen Entwicklungsstand zumindest bei Gesamtstammzahlen von nicht weniger als 8.000 St./ha auch in freigestellten Voranbauten ca. 300 Z-Baum-Anwärter pro Hektar zu finden sind. Diese Zahl wird in der Entwicklungsphase des schwachen Gertenholzes als Mindestanforderung verstanden. Hohe Pflanzenzahlen beim Voranbau stellen also, zumindest was diese auf den Einzelbaum bezogene Betrachtungsweise der Z-Baum-Anwärter anbelangt, eine gewisse Versicherung für den Fall eines unplanmäßigen Schirmverlusts dar. Offenbleiben muss zunächst, inwieweit die gesteigerte Wuchsdynamik der freigestellten Voranbauten zu weiteren qualitativen und/oder soziologischen Umsetzprozessen führt. Bekanntlich sind die Qualitäts- und die darauf aufbauende Z-Baum-Ansprache in Beständen, die wie die hier betrachteten Voranbauten noch am Anfang der Qualifizierungsphase stehen, mit ganz erheblichen Unsicherheiten verbunden (vgl. OTT ET AL. 2003; RÖHRIG ET AL. 2006). Dies gilt in besonderem Maß für Baumarten wie die Buche mit ihrer enormen Plastizität und lang anhaltenden Zuwachsdynamik. Die vorliegenden Ergebnisse können also lediglich erste Anhaltspunkte zur Häufigkeit von Z-Baum-Anwärtern unter verschiedenen Bestandesbedingungen geben, erlauben aber keinesfalls Aussagen zu endgültigen Z-Baum-Zahlen.

Es liegt in den Händen der örtlichen Wirtschaftler, das hier identifizierte Potenzial von Z-Baum-Anwärtern in den stammzahlreichen Voranbauten auf Sturmflächen zu sichern. Dazu sollte zunächst lediglich deren Konkurrenzverhältnis gegenüber Nachbarbäumen beobachtet werden. In vielen Fällen wird kein aktives Eingreifen vonnöten sein. Oftmals aber werden die

erwünschten wipfelschäftigen und feinastigen Individuen von schlecht geformten, großkronigen Wölfen bedrängt, sodass Letztere zunehmend die Oberhand gewinnen. Für solche Situationen empfiehlt es sich, die Bedränger in der Konkurrenz zurückzunehmen. Allerdings darf dies keinesfalls mit einer Frühförderung der Z-Baum-Anwärter einhergehen, da sonst der Qualifizierungsprozess (Astreinigung) negativ beeinträchtigt würde. Ziel sind ausschließlich der Erhalt und die weitere Qualifizierung gut veranlagter Optionen. Deshalb wird ein extensives Vorgehen bevorzugt, das heißt, dass auf eine Bedrängerentnahme unbedingt zu verzichten ist. Stattdessen sollte ausschließlich in sehr angespannten bzw. bereits zugunsten unerwünschter Exemplare verschobenen Konkurrenzsituationen durch Ringeln derselben eingegriffen werden. Dadurch werden die betreffenden Bäume in ihrer Konkurrenzkraft geschwächt und sterben allmählich ab (vgl. WILHELM & RIEGER 2013).

Von allen Untersuchungsfaktoren beeinflusste das auf den Freistellungszeitpunkt bezogene Entwicklungsstadium der Voranbauten deren qualitative Entwicklung am wenigsten. Die eingangs formulierte Hypothese 3 wird daher verworfen. Unabhängig davon, ob der Schirmverlust die Voranbauten im Jungwuchsstadium oder erst nach Dickungsschluss ereilte, zeigten diese die hinsichtlich der Zuwachs- und Qualitätsparameter beschriebenen Reaktionsmuster in nahezu identischer Ausprägung. Demnach hat selbst ein vergleichsweise spät eintretender Schirmverlust drastische Auswirkungen auf die Buchenqualität, zumindest wenn er, wie im vorliegenden Fall, abrupt erfolgt. Von Bedeutung ist der Dickungsschluss vor allem im Zusammenspiel mit der intraspezifischen Konkurrenz (Pflanzendichte), da Letztere ihre Wirkung erst mit dem Schließen der Bestände entfaltet. Dies zeigte sich vor allem im Astreinigungsprozess sowie bei der Tiefzwieselhäufigkeit. Für die genannten Parameter waren bei stammzahlreichen Voranbauten, die erst nach Dickungsschluss freigestellt wurden, keine bzw. nur deutlich abgeschwächte Qualitätsverluste festzustellen. Abgesehen davon waren die freistellungsbedingten Qualitätseinbußen selbst bei hoher Pflanzendichte nahezu unabhängig vom Entwicklungsstadium der Voranbauten.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass nach Eintritt eines unplanmäßigen Schirmverlusts nur sehr eingeschränkte Möglichkeiten bestehen, durch aktive Maßnahmen nachträglich zugunsten der Buchenqualität einzugreifen. Die einzige realistische Chance liegt wohl in der konsequenten und ausdauernden Waldpflege zum Erhalt noch bestehender Z-Baum-Anwärter. Für zukünftige Waldumbaumaßnahmen mittels Buchenvoranbau muss deshalb das Motto „Prävention statt Reaktion“ gelten. Das heißt, durch ein standort- und risikodifferenziertes Vorgehen dürfen Buchenvoranbauten mit dem Ziel der Wertholzproduktion von vornherein

nur dort angelegt werden, wo eine hohe Wahrscheinlichkeit der Zielerreichung gegeben ist.

Bezüglich der Interpretation und Umsetzung der hier erarbeiteten Handlungsempfehlungen sollen abschließend noch einige Hinweise gegeben werden. Zunächst sei nochmals ausdrücklich darauf hingewiesen, dass alle hier getroffenen Aussagen auf einer einmaligen Datenerhebung fußen und damit einer Momentaufnahme gleichkommen. Die Erhebung spiegelt ausschließlich den Status quo sechs Jahre nach dem Schirmverlust wider. Dementsprechend können auch die daraus abgeleiteten Handlungsempfehlungen nur von diesem Zustand ausgehen. Weiter in die Zukunft gerichtete Qualitätsprognosen sind allein auf Basis dieser Datengrundlage keinesfalls zuverlässig möglich. Das in Relation zum Produktionszeitraum für Buchenwertholz geringe Alter der hier untersuchten Voranbauten und die bis ins hohe Alter anhaltende Plastizität der Buche verbieten dies. Die ältesten der analysierten Voranbauten waren gerade einmal rund 25 Jahre alt. Realistische Qualitätsprognosen sind jedoch frühestens nach Abschluss der Qualifizierungsphase, also meist nicht vor dem Alter von 40 Jahren möglich (LÜPKE 1986; KLÄDTKE 2002; NAGEL & SPELLMANN 2008). Unsicherheiten bestehen bei solch jungen Beständen vor allem hinsichtlich der Dauerhaftigkeit aktuell vorzufindender und offenbar qualitätsmindernder Merkmale (Zwiesel, Starkäste vs. Astreinigung etc.). Die hier aufgestellten Handlungsempfehlungen sind aus dem Grund eher als Richtwerte und nicht als eins zu eins umsetzbare Gesetzmäßigkeiten zu interpretieren. Dies gilt vor allem für Angaben zu den Pflanzenzahlen beim Buchenvoranbau.

Nicht zuletzt aus Gründen der bestehenden Unsicherheiten sind die abgegebenen Qualitätseinschätzungen eher konservativ angelegt. Dies äußert sich beispielsweise darin, dass jeder vorgefundene Zwiesel erfasst wurde und somit unter der Annahme einer dauerhaften Entwertung in die Qualitätsbeurteilung einfluss. Tatsächlich ist aber bekannt, dass Zwiesel häufig von temporärer Natur sind und im Lauf der Entwicklung wieder vergehen können (vgl. DRÉNOU 2000; DONG ET AL. 2007). Sehr ähnlich ist die Situation hinsichtlich der Astigkeit einzuschätzen. Auch hier wurde mit dem Durchmesser des stärksten Grünasts stets nur die am stärksten entwertende Ausprägung aufgenommen. Auf Basis dieser konservativ-pessimistischen Qualitätsbeurteilung wurden dann die Handlungsempfehlungen erstellt. Vor diesem Hintergrund ist anzunehmen, dass ihre Umsetzung mit einiger Sicherheit zum erhofften Qualitätsziel führt. Dies wird dadurch zusätzlich bekräftigt, dass die eigenen Richtwerte zur Pflanzenzahl beim Voranbau mit denen früherer Arbeiten bzw. praktischen Erfahrungen weitgehend konform gehen (vgl. KOCH 1992; LEDER & WEIHS 2000; LEONHARDT & WAGNER 2006; RUMPF & PETERSEN 2008).

## 8 Ausblick

Mit der vorliegenden Forschungsarbeit ist es gelungen, die Reaktion zunächst überschirmter und dann abrupt in Freiland geratener junger Buchen sowie daraus unmittelbar resultierende Konsequenzen für die Qualität abzubilden. Die anhand einzelner Parameter beobachtete Reaktion überraschte hinsichtlich ihrer Intensität, zumal sie innerhalb von nur sechs Vegetationsperioden nach der sturmbedingten Freistellung vonstattenging. Vor diesem Hintergrund drängt sich zwangsläufig die Frage nach der weiteren Entwicklung der Bäume auf. Wird das Wachstum langfristig auf diesem hohen Niveau fortgeführt oder lässt es wieder nach? In Verbindung damit steht auch die Frage, ob die Buchenqualität nach sechs Jahren im Freiland bereits ihren Tiefpunkt erreicht hat oder weitere Verschlechterungen zu erwarten sind. Vielleicht kehrt sich der bisherige Trend infolge der stetig steigenden intraspezifischen Konkurrenz teilweise sogar um, sodass die Formen auch auf den Freiflächen perspektivisch wieder etwas besser werden? All diese Fragen können durch eine einmalige Datenerhebung nicht geklärt werden, sondern nur mithilfe von Langzeitstudien, zu denen an dieser Stelle dringend geraten wird.

Offen blieb bisher auch, wie lange Buchenvoranbauten überhaupt den Schutz des Fichtenschirms benötigen. Diesbezügliche Kenntnisse wären vor allem für die Praxis von großem Wert. Sie würden die Wahl des optimalen Einbringungszeitpunkts von Buchenvoranbauten in Fichtenbestände erheblich erleichtern. Dieser Aspekt ist nicht zuletzt aus betriebswirtschaftlicher Sicht besonders relevant. Ein auf die Wuchsdynamik des Bestandes abgestimmter Einbringungszeitpunkt gewährleistet, dass den Buchen einerseits ein ausreichend langer Schirmschutz zur Verfügung steht und andererseits der Lichtungszuwachs des Fichtenaltholzes optimal ausgenutzt werden kann. Dadurch könnten Hiebsopfer zugunsten der Buchen ebenso vermieden werden wie eine entwertende Überalterung der Fichte.

Zu klären wäre weiterhin, ob der freistellungsbedingte Schock und der damit einhergehende Qualitätsverlust geringer ausfallen, wenn die Buchen zuvor langfristig auf den Freiland vorbereitet wurden. Es wäre denkbar, einen solchen Adaptionsprozess frühzeitig durch eine kontinuierliche, aber vorsichtige Nachlichtung anzustoßen. Dieser Aspekt wäre auch mit Blick auf die zu untersuchende Mindestüberschirmungsdauer von Belang. Den Anstoß zu der Überlegung gaben die eigenen Ergebnisse, denen zufolge es offenbar kaum einen Unterschied macht, ob Buchenvoranbauten im Alter von zehn oder erst nach 25 Jahren verselbstständigt werden. So pauschal erscheint das nicht ganz einleuchtend. Es wird deshalb vermutet, dass

der Effekt der abrupten, schockartigen Freistellung eventuell die Wirkung des Alters bzw. Stadiums überlagert.



## 9 Zusammenfassung

### Hintergrund und Zielstellung

Im Zuge des Waldumbaus wird die Rotbuche (*Fagus sylvatica* L.) über Voranbau in Fichtenreinbestände eingebracht. Deren Bewirtschaftung zielt meist auf die Erzeugung von Wertholz ab. In diesem Zusammenhang dient der Fichtenschirm als Instrument der Steuerung der Ressourcenversorgung und damit der Qualifizierung der Buchen („edle Halbschattform“). Die in der Vergangenheit zumeist niederdurchforstungsartige Behandlung bedingt jedoch, dass viele Fichtenbestände hinsichtlich ihrer Stabilität keine geeigneten Ausgangsbedingungen für eine langfristige Schirmstellung bieten. Die Schadbilder infolge immer häufiger auftretender Windwurfereignisse verdeutlichen dies eindrucksvoll und belegen unmissverständlich, dass diesbezüglich Handlungsbedarf besteht. Die vorliegende Untersuchung ging daher den Folgen eines unplanmäßigen, sturmbedingten Schirmverlusts für Wachstum und Qualität vorangebauter Rotbuchen nach. In diesem Zusammenhang wurden auch der Einfluss von Pflanzendichte und Entwicklungsstadium des Voranbaus geprüft.

### Material und Methoden

In den beiden Modellregionen „Thüringer Wald und Hügelland“ sowie „Sächsisches Erzgebirge und Vorland“ wurden Qualitätserhebungen (vgl. BÖRNER ET AL. 2003) auf insgesamt 29 Buchenvoranbauflächen durchgeführt. Auf 17 dieser Flächen wurde der Fichtenschirm im Januar 2007 durch den Orkan KYRILL meist vollständig geworfen. Seitdem entwickelten sich die Rotbuchen ohne Schirmschutz. Alle weiteren Voranbauten stehen nach wie vor unter Fichtenschirm und dienen als Referenz für Wachstum und Qualität. Jedem Voranbau wurde das auf den Freistellungszeitpunkt bezogene Entwicklungsstadium (vor oder nach Dickungsschluss) zugewiesen.

Zur repräsentativen und objektiven Festlegung der Aufnahmeeinheiten in den Flächen wurde ein rasterbasiertes Probekreisverfahren gewählt. Das quadratische Gitternetz mit einer Weite von 20 m wurde mittels GPS im Gelände eingemessen. Die Rasterschnittpunkte bildeten zugleich die Zentren der 19,95 m<sup>2</sup> großen Probekreise (Plotradius: 2,52 m). Die Datenaufnahme erfolgte auf insgesamt 204 repräsentativen Plots. In jedem Probekreis wurde die Pflanzenzahl erhoben und auf Hektarwerte hochgerechnet. Für die Referenzflächen erfolgte hier weiterhin eine Ansprache des Überschirmungsgrads. Einbezogen wurden nur

Plots mit locker-lichtem Fichtenschirm. Die Datenerhebung wurde an den maximal sechs höchsten Buchen eines jeden Probekreises vorgenommen und konzentrierte sich damit auf die (vor-)herrschenden und somit vitalsten Bestandesglieder. Daraus resultierte ein Stichprobenumfang von 895 Einzelbäumen. Die Datenaufnahme fand nach Abschluss der Vegetationsperiode 2012 statt, sodass seit der Freistellung sechs Jahre vergangen waren.

### Mathematisch-statistische Auswertung

Aufgrund der räumlich geschachtelten Versuchsanlage kamen bevorzugt gemischte Modelle zur Anwendung. In Abhängigkeit vom Skalenniveau der Response-Variable und dem vorliegenden Verteilungstyp wurden lineare gemischte Modelle (LMM) oder aber generalisierte lineare gemischte Modelle (GLMM) eingesetzt. Multinomialdaten mit einer festen Rangordnung der Response-Kategorien wurden mit einem erweiterten logistischen Regressionsmodell, der Proportional Odds Logistic Regression (POLR), analysiert. Zur Umsetzung aller beschriebenen Methoden wurde die Statistiksoftware R (Version 3.0.1) genutzt.

### Ergebnisse

- **Wachstum und Zuwachsreaktion:** Sechs Jahre nach dem Sturmereignis besteht kein signifikanter Höhenunterschied zwischen den Buchen auf Sturmflächen und unter Schirm. Allerdings stiegen die Haupttrieblängen ab dem zweiten Jahr der Freistellung an, sodass der Wachstumsgang der freigestellten Individuen signifikant von dem der überschirmten Bäume abweicht. Hohe Stammzahldichten im Voranbau fördern das Höhenwachstum. Das Durchmesserwachstum profitiert im Vergleich dazu deutlich stärker von der Freistellung, wie die signifikant größeren Wurzelhalsdurchmesser der freigestellten Buchen belegen. Entsprechend intensiv fiel auch die Reaktion des Radialzuwachses aus, die ohne Verzögerung bereits im Jahr der Freistellung einsetzte. Der stärkste Grünast zeigt einen im Vergleich zum Stamm synchronen Wachstumsgang, wenn auch auf niedrigerem Niveau. Unabhängig von der Überschirmung dämpfen hohe Bestandesdichten das Durchmesserwachstum. Gemessen am H/D-Verhältnis weisen die Buchen unter Schirm sowie bei hoher Pflanzendichte einen schlankeren Wuchs auf. Zwischen den beiden Entwicklungsstadien, das heißt vor oder nach Dickungsschluss, bestand kein Unterschied.

- **Astigkeit und Astreinigung:** Sechs Jahre nach dem Schirmverlust sind an den freigestellten Buchen signifikant größere Astdurchmesser bei zugleich steileren Astwinkeln zu erkennen. Mit zunehmender Pflanzenzahl im Voranbau werden die Buchen feinastiger, während der Astwinkel unbeeinflusst bleibt. ASIX und Grünastdichte sinken nur auf der Freifläche merklich, erreichen dadurch aber ab Pflanzenzahlen von 8.500 St./ha bzw. 6.000 St/ha niedrigere Werte als Buchen unter Schirm. Zwischen den beiden Entwicklungsstadien sind hinsichtlich der Wirkung des Schirmverlusts keine Unterschiede zu verzeichnen. Totastanzahl und grünastfreie Schaftlänge hingegen werden durch die Freistellung nicht beeinflusst. Auf der Freifläche wurden jedoch stärkere Totäste gefunden. Mit zunehmender Pflanzenzahl im Voranbau steigen Anzahl und Durchmesser der Totäste sowie die grünastfreie Schaftlänge signifikant. Am deutlichsten tritt dieses Phänomen bei Voranbauten nach Dickungsschluss zutage.
- **Schaft- und Kronenmorphologie sowie Häufigkeit von Z-Baum-Anwärtern:** Sechs Jahre nach dem Schirmverlust sind an freigestellten Buchen signifikant häufiger Steiläste und vor allem Zwiesel erkennbar. Im Stadium vor Dickungsschluss treten auf Freiflächen doppelt bis dreifach so häufig Tiefzwiesel auf wie unter Fichtenschirm. Mit zunehmender Pflanzenzahl im Voranbau sinkt die Zwieselanzahl moderat, der Anteil tief gezwieselter Buchen sogar rapide. Dadurch kommen im Stadium nach Dickungsschluss ab 9.000 Buchen pro Hektar unabhängig von der Überschirmung kaum noch Tiefzwiesel vor. Die gutachterliche Qualitätsansprache bestätigt, dass durchschnittlich etwa 60–70 % aller Buchen auf den KYRILL-Flächen den Zwieseltypen zuzurechnen sind, während unter Fichtenschirm mit ca. 90 % die (sehr) guten Formen dominieren. Mit zunehmender Bestandesdichte steigt der Anteil der besseren Qualitäten tendenziell, jedoch nicht signifikant. Die gutachterliche Qualitätsansprache zeigt eine sehr hohe Übereinstimmung mit der anhand von ASIX, Astwinkel und Zwieselzahl einer Buche modellierten Qualitätsklasse. Unter Fichtenschirm ist die Dichte der Z-Baum-Anwärter grundsätzlich sechsmal so hoch wie in freigestellten Voranbauten. Diese steigt aber unabhängig vom Schirm mit der Pflanzendichte des Voranbaus signifikant an.

### Schlussfolgerung und Handlungsempfehlungen

Der Fichtenschirm hat eine herausragende Bedeutung für die Qualitätsdifferenzierung von Buchenvoranbauten. Eine locker-lichte Überschirmung stellt den geeigneten Kompromiss zwischen vitalem Wachstum und Qualitätsentwicklung der Buchen dar. Ungeachtet aller

weiteren Faktoren bewirkt ein plötzlicher, unplanmäßiger Schirmverlust gravierende Qualitätseinbußen der an den Halbschatten adaptierten Buchen. Sehr gute Qualitäten, das heißt wipfelschäftige Buchen mit gering dimensionierten, horizontal ausgerichteten Ästen und zügiger Astreinigung, sind nur durch die Kombination aus langfristig stabiler Überschirmung und Pflanzendichten im Voranbau ab 6.000–8.000 St./ha zu erreichen. Eine Kompensation des Freistellungseffekts ist durch hohe Pflanzenzahlen im Voranbau nur in sehr begrenztem Umfang möglich. Ein hoher Seitendruck kann den fehlenden Schirmdruck demnach nicht ersetzen. Selbst bei höchster Bestandesdichte waren die Formen auf den Freiflächen weitaus schlechter als unter Schirm. Dies gilt unabhängig vom Entwicklungsstadium der Voranbauten. Der Bestandesschluss bewahrt also offenbar nicht vor freistellungsbedingten Qualitätsverlusten. Allerdings gewährleisten Pflanzendichten ab 8.000–9.000 St./ha, dass die Tiefzieselbildung in geschlossenen Buchendickungen auch bei einer abrupten Freistellung weitgehend unterbleibt und eine hinreichende Anzahl von Z-Baum-Anwärttern zur Verfügung steht.

Ist es erst einmal zu einem Schirmverlust über einem Buchenvoranbau gekommen, bestehen kaum Möglichkeiten, aktiv zugunsten der Buchenqualität tätig zu werden. Die einzige Chance besteht im gezielten Erhalt bestehender Z-Baum-Anwärter und deren konsequenter Pflege. Für zukünftige Waldumbaumaßnahmen wird deshalb ein standort- und risikodifferenziertes Vorgehen beim Buchenvoranbau empfohlen. Dieses sollte sich an erster Stelle an der Stabilitätssituation des Fichtenschirms orientieren. Ausschließlich bei gegebener Stabilität ist das Produktionsziel Buchenwertholz als realistisch einzustufen, sodass kostenintensive Voranbauten mit den oben genannten Pflanzendichten angelegt werden sollten (Funktionsumbau). Bei einer offensichtlich (sehr) hohen Prädisposition der Fichtenschirme gegenüber Sturm und Borkenkäferbefall ist stattdessen ein extensiver Voranbau mit reduzierter Pflanzenzahl vorzuziehen. Dieser zielt im Sinn eines Nachhaltsumbaus primär auf eine Stabilisierung der Waldökosysteme ab und trägt zur Erhöhung der Flexibilität der zukünftigen Waldbewirtschaftung bei (WAGNER 2007, 2008).

## 10 Summary

### Background and Objectives

In the course of forest conversion European beech (*Fagus sylvatica* L.) is introduced in spruce monocultures by advanced planting. Management of beech stands aims mostly on production the of high quality timber. In this context, the shelterwood of spruce officiates as an instrument for controlling resource availability and thus to qualify advanced planted beech. But because of low-thinning treatment in past, most spruce stands do not provide suitable conditions for long-term shelterwood with regard to their missing stability. The situation of forest damage due to periodic windthrow events illustrate this impressively and show need for action. Therefore, the present study analyzed the consequences of an unplanned, storm-related loss of canopy for growth and quality of advanced planted beech. In this context, the influence of stand density and developmental stage of advanced regeneration will be examined as well.

### Material and Methods

In two model regions "Thuringian Forest" (middle of Germany) and "Saxon Oremountains" (East of Germany) quality investigations (cf. BÖRNER ET AL. 2003) were carried out on a total of 29 advanced planted beech stands. In 17 of these stands the spruce canopy was mostly completely thrown by hurricane KYRILL in January of 2007. Thus, the beech trees have grown without shelter since then. The other advanced regeneration stands are still under spruce canopy and serve as a reference for growth and quality. A developmental stage (before or after thicket-stage) was designated to each advanced planting site in reference to the time of overhead canopy release.

For representative and objective definition of experimental plots a grid-based plotdesign was used. The square grid with distance of 20 m was calibrated by GPS in the field. The grid intersections built the centers of 19.95 m<sup>2</sup> circular sample areas (plot radius 2.52 m). Data was collected on a total of 204 representative plots. On each plot, the number of beech plants was collected and extrapolated to hectare values. In addition, the canopy closure was also estimated for reference plots within the sample plots. For data collection only plots with moderate canopy closure were included (maximum area of canopy gaps: one crown projection). Data collection was carried out at maximum of six highest trees per plot. Thus it is concentrated on (pre-) dominant and therefore most vital individuals. This resulted in a

sample size of 895 trees. The data collection was started after growing season in 2012, six years after canopy release.

### Mathematical and statistical analysis

Due to spatially nested plot design Mixed Models have been applied preferably. Depending on scale level of the response variable and given distribution type, Linear Mixed Models (LMM) or Generalized Linear Mixed Models (GLMM) were used. Multinomial data with fixed order of response categories was analyzed with an extended logistic regression model, the Proportional Odds Logistic Regression (POLR). These calculations were implemented by statistical software R (version 3.0.1).

### Results

- **Growth and reaction of annual increment:** Six years after the storm event there is no significant difference in height between beech trees on storm areas and such under shelterwood. However the annual increment of terminal shoot rose from the second year after release, so the trend of increment deviates significantly from beech trees under shelterwood. High stand density in advanced planting promotes height growth. Diameter growth benefits significantly more from release compared to height growth. So released beech trees showed significantly larger root collar diameters. Reaction of radial increment, which began immediately after release, was appropriately intensive. The thickest living branch shows synchronous trend of increment, but on a lower level. Regardless of canopy cover high stand densities delimitate diameter growth. The H/D-ratio demonstrated that beech trees under shelterwood and in high density stands showed more slender forms. There was no difference between the two developmental stages.
- **Branchiness and natural pruning:** Six years after the loss of spruce canopy significantly greater branch diameters in combination with steeper branch angles were found on released beech trees. With increasing stand density in advanced planting the beeches showed finer branches while branch angles remain unaffected. ASIX and the density of living branches decreases appreciably for released trees only, so reached lower values than trees under shelterwood by stand densities off 8.500 pcs/ha and 6.000 pcs/ha, respectively. There was no difference of release effect between the developmental stages. Number of dead branches and bole-length without living branches however, were not affected by loss of canopy. However more dead branches were found on beeches in the



opening. With increasing stand density in advanced planting, the number and diameter of dead branches and bole-length without living branches increased significantly. This was most distinct for beech stands that reached thicket-stage before release.

- **Stem- and crown shape, number of crop tree candidates:** Six years after canopy-loss, released beeches showed significantly more steep branches and especially forks. Released stands before thicket-stage showed two to three times as likely deep-forks in relation to stands under spruce canopy. With increasing stand density in advanced planting the number of forks per trees decreased moderately, the proportion of deep-forks even rapidly. In consequence, regardless of the canopy cover, deep-forks only occurred marginally in beech stands after thicket-stage with at least 9.000 pcs./ha. The expert quality estimation confirms that on average about 60–70 % of beeches on KYRILL sites belong to a “fork type”, while under spruce shelterwood (very) good shapes dominate with about 90 %. With increasing stand density, the proportion of good shapes tends to increase, however not significantly. The estimated quality class showed a very high correlation with the modeled one, based on ASIX, branch angle and fork number per beech. The density of crop tree candidates under spruce canopy is basically six times as high as in released stands. However, regardless of shelterwood it increases significantly with stand density.

#### Conclusion and silvicultural implication:

Spruce canopy is of outstanding importance for quality and differentiation of advance planted beech. A moderate shelterwood is the appropriate compromise between vital growth and good quality development. Regardless of any other factors, a sudden and unplanned loss of canopy effects a loss of quality of shade adapted beech trees. Very good qualities, that means straight to top trees with fine, horizontally oriented branches and timely self-pruning, can only be achieved by combining of long-term shelterwood and stand densities in advanced planting of at least 6.000–8.000 pcs./ha. Compensation of the release effect through high stand density in advanced planting is only possible to a very limited extent. High intraspecific competition cannot replace the lack of shelterwood. Beech shapes were far worse than under shelterwood, even at the highest stand density. This applies regardless of the developmental stage of a beech stand. So closing of advanced planted beech stand (thicket-stage) does not prevent release related quality losses. However, plant densities from 8.000–9.000 pcs./ha ensure that deep fork formation in closed beech thickets is largely suppressed and a sufficient number of crop tree candidates is available, even after abrupt release.

Once an abrupt loss of canopy above advanced planted beech has occurred, there are hardly any opportunities to actively engage in favor of beech quality. The only chance is maintenance of existing crop tree candidates and their consistent care. Therefore, for future forest conversion with beech, a site- and risk-differentiated approach is recommended for advanced planting. This should be based firstly on the stability of shelterwood. Only with high stand stability, the target of high-grade beech-timber is realistic, so costly beech plantings with high stand density mentioned above should be applied. For spruce stand with an obvious (very) high risk towards bark beetles and / or storms, an extensive advanced planting with reduced stand density is preferable. In terms of “Sustainability-conversion” this aims primarily on stabilizing forest ecosystems and increasing flexibility for future forest management (WAGNER 2007, 2008).

## 11 Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1: Vegetationslandschaften Sachsens aus standörtlich-vegetationskundlicher Sicht. Kartengrundlage aus LAF (1997), verändert. .... 9
- Abbildung 2: Überblick über die potenzielle natürliche Vegetation Thüringens. Grundlage ist die Karte der pnV im Maßstab 1:250.000. Zur besseren Übersichtlichkeit sind die Legendeneinheiten auf der Ebene der Obergruppe bzw. bedeutender Hauptgruppen zusammengefasst. Kartengrundlage aus BUSHART & SUCK (2008), verändert. .... 13
- Abbildung 3: Beispiel einer GIS-gestützten Flächensuche im Thüringer Forstamt Frauenwald unter Verwendung von Forstgrundkarte und Sturmflächen-Shape. .... 21
- Abbildung 4: GIS-gestützte Kontrolle der Überschirmungssituation mittels Orthofoto und Waldeinteilung in zwei vorausgewählten, mit Buche vorangebauten Beständen des Forstbezirks Eibenstock. Fichtenschirme, bei denen der Sturm lediglich zu kleinflächigen, unregelmäßigen Unterbrechungen des Kronenschlusses geführt hat, beispielsweise in der Teilfläche 230a6 im Revier Carlsfeld (Bild links), sind für die Untersuchung ungeeignet. Idealerweise sollte der Fichtenschirm komplett durch den Sturm geworfen worden sein, wie in der Teilfläche 45a1 des Reviers Grünheide, sodass homogene Bedingungen auf der Flächen herrschen (Bild rechts). .... 22
- Abbildung 5: Geografische Lage der 14 Versuchsflächen in der Modellregion „Thüringer Wald und Hügelland“. Die Flächen 1–5 befinden sich im Bereich des Forstamts Oberhof, 6–8 im Bereich des Forstamts Frauenwald und 9–14 im Bereich des Forstamts Sonneberg. Quelle des Orthofotos: LANDESAMT FÜR VERMESSUNG UND GEOINFORMATION (2015). .... 25
- Abbildung 6: Geografische Lage der 15 Versuchsflächen in der Modellregion „Sächsisches Erzgebirge und Vorland“. Die Flächen 15–23 befinden sich im Forstbezirk Bärenfels, 24 und 25 im Forstbezirk Chemnitz und 27–29 im Forstbezirk Eibenstock. Quelle des Orthofotos: LANDESVERMESSUNGSAMT SACHSEN (2014). .... 26
- Abbildung 7: Beispielhafte Darstellung der GIS-gestützten Rasteranlage. Unter Verwendung der digitalen Forstgrundkarte und eines aktuellen Orthofotos wurde ein systematisches Raster der Maschenweite 30 m x 30 m über die ausgewählten Bestände gelegt. .... 32
- Abbildung 8: Einmessen des Rasters auf einer Untersuchungsfläche mittels GPS-Empfänger und Feldrechner (links). Die Rasterpunkte wurden mit Tonkinstäben vermarkt und nummeriert (Mitte). Alle im Probekreis liegenden Buchen wurden mit Forstmarkierfarbe gekennzeichnet und einer fortlaufenden Nummer versehen (rechts). .... 32
- Abbildung 9: Übersicht über die Verteilung der ausgewählten Probepunkte auf die 29 Versuchsflächen in Abhängigkeit von der Pflanzenzahl pro Hektar. Die Darstellung erfolgt getrennt nach den Untersuchungsfaktoren „freigestellte Voranbauten“ (obere Zeile) und „Referenzflächen“ (untere Zeile). Zudem sind Flächen vor Dickungsschluss (linke Spalte) und nach Dickungsschluss (rechte Spalte) separiert. Die schraffierten Balken kennzeichnen die Modellregion „Sächsisches Erzgebirge und Vorland“. .... 35
- Abbildung 10: Eine Alukombileiter diente bei der Datenaufnahme als Hilfsmittel zur besseren Erreichbarkeit der oberen Kronenbereiche. Diese konnte als Stand- oder Anlegeleiter

eingesetzt werden (links bzw. Mitte). Bei gegebener Stabilität wurde die Leiter steil an den Baum gestellt und mit einem Spanngurt daran befestigt (rechts). ..... 37

Abbildung 11: Entscheidungsbaum zur Wahl des geeigneten statistischen Modellansatzes. Die Darstellung berücksichtigt nur für diese Arbeit relevante Verteilungsarten und Modellansätze. .... 39

Abbildung 12: QQ-Plot am Beispiel des Grünastdurchmessers der Buchen. Die beobachteten Werte waren nicht normalverteilt (links), was durch eine Logarithmustransformation korrigiert werden konnte (rechts). .... 42

Abbildung 13: Prüfung der Homoskedastizität anhand einer Abbildung der standardisierten Residuen gegenüber der Modellschätzung. Steigt die Streuung der Werte mit zunehmendem X-Wert („Trompetenform“ der Punktwolke), liegt Heteroskedastizität vor (links). Dies konnte mithilfe einer Varianzstrukturfunktion behoben werden (rechts). .... 43

Abbildung 14: Korrelogramme bilden die Ähnlichkeit der Modellresiduen über die räumliche Distanz ab. Eine positive Korrelation – wie sie im linken Diagramm bis zur Distanz von ca. 90 m deutlich zu erkennen ist – ist ein Indikator für eine räumliche Autokorrelation. Die Darstellungen zeigen die Korrelation sowie die dazugehörigen 95 %-Konfidenzintervalle. Nur wenn die Konfidenzintervallgrenzen die Nulllinie schneiden, liegt eine signifikante räumliche Autokorrelation vor. Diese wurde durch entsprechende Korrelationsfunktionen berücksichtigt (rechts). .... 44

Abbildung 15: Grafische Kontrolle der zeitlichen Autokorrelation aufeinanderfolgender Messungen mit festen Abständen („Lags“). Zu erkennen ist die Überschreitung der Signifikanzschranken ab der dritten Zeitperiode (links). Die aufeinanderfolgenden Messwerte sind somit nicht unabhängig. Dies kann durch die „autoregressive Korrelationsstruktur“ zumindest weitgehend berücksichtigt werden (rechts). .... 46

Abbildung 16: Goodness-of-Fit-Plot zur Gegenüberstellung der beobachteten Häufigkeitsverteilung (graue Balken) mit einer optimalen Poisson-Verteilung (rote Punkte). Ein Überschreiten der x-Achse zeigt an, dass diese Gruppe häufiger auftritt, als auf der Grundlage der optimalen Poisson-Verteilung erwartet wurde. Erreichen die grauen Balken die x-Achse nicht, ist die entsprechende Gruppe unterrepräsentiert. .... 48

Abbildung 17: Triebmorphologie der Rotbuche nach ROLOFF (1986). Die Grenzen zweier Jahrestriebe (hier Langtriebe) sind durch dicht gedrängte Rillen auf der glatten Rinde, die Triebbasisnarben, gekennzeichnet (links). Zudem weist die Buche eine typische akrotone Verzweigung auf, welche sich in einer Längenzunahme der Seitentriebe mit steigender Ansatzhöhe an einem Jahrestrieb widerspiegelt. Die Grenzen zwischen zwei Jahreszuwächsen befinden sich somit oberhalb der Absätze in der Verzweigung (rechts). Zeichnungen aus ROLOFF (1986). .... 57

Abbildung 18: Die Gewinnung der Stamm- und Astscheiben erfolgte mittels Motorkettensäge (links). Die Rohscheiben wurden auf dem Bandschleifer bis zur 240er-Körnung geschliffen (Mitte). Nach dieser Präparation waren die Jahrringe gut erkennbar (rechts). .... 58

Abbildung 19: Computergestützte Jahrringanalyse mit Linearmesstisch, Binokular und entsprechender Software (links). Auf jeder Scheibe wurden die vier zu messenden Radien und die Jahrringgrenzen markiert und in Fünferschritten nummeriert (rechts). .... 59

Abbildung 20: Wurzelhalsdurchmesser der Buchen im Jahr 2012 in Abhängigkeit von der Pflanzenzahl pro Hektar, getrennt nach Entwicklungsstadium und Überschirmung.....	66
Abbildung 21: Modellschätzung der jährlichen Haupttrieblängen in der Periode 2005–2012 nach Formel (11). Die Darstellung erfolgt getrennt nach Entwicklungsstadium und Überschirmung. Die Pflanzenzahlen pro Hektar wurden zugunsten einer übersichtlichen Darstellung klassifiziert. Die Kennzeichnung „KYRILL“ markiert den Zeitpunkt des Schirmverlusts im Januar 2007. ....	67
Abbildung 22: Modellschätzung der Jahrringbreiten an Stamm und stärkstem Grünast der Buchen in der Periode 2000–2013 nach Formel (12). Die Darstellung erfolgt getrennt nach Entwicklungsstadium und Überschirmung. Die Pflanzenzahlen pro Hektar wurden zugunsten einer übersichtlichen Darstellung in drei Klassen eingeteilt. Die Kennzeichnung „KYRILL“ markiert den Zeitpunkt des Schirmverlusts im Januar 2007. ....	70
Abbildung 23: Spätfrosteinwirkungen im Mai 2012 auf der Versuchsfläche Neuenbau 630a5-a8 im Thüringer Forstamt Sonneberg.....	79
Abbildung 24: Unter Verwendung einer Messlatte mit Millimetereinteilung wurden die Buchen in 1,5-m-Segmente eingeteilt und die Grenzen mit Wachskreide markiert (links). Die Messlatte diente auch zur Erhebung der jeweiligen Astansatzhöhen. Die Messung des Astwinkels erfolgte mit einer Messlehre (5°-Einteilung, rechts).....	90
Abbildung 25: Durchmesser des stärksten Grünasts der Buchen im Jahr 2012 in Abhängigkeit von der Pflanzenzahl pro Hektar, getrennt nach Entwicklungsstadium und Überschirmung..	93
Abbildung 26: Der relative Astdurchmesser ASIX in Abhängigkeit von der Pflanzenzahl pro Hektar, getrennt nach Entwicklungsstadium und Überschirmung. Der ASIX gibt die Relation von Astdurchmesser und Wurzelhalsdurchmesser des Baumes an.....	94
Abbildung 27: Die Anzahl primärer Totäste je Buche, dargestellt über die Pflanzenzahl pro Hektar, getrennt nach Entwicklungsstadium und Überschirmung.....	95
Abbildung 28: Die grünastfreie Schaftlänge der Buchen dient als Indikator des Astreinigungsprozesses. Die Darstellung erfolgt in Abhängigkeit von der Pflanzenzahl pro Hektar, getrennt nach Entwicklungsstadium und Überschirmung.....	97
Abbildung 29: Grafische Darstellung der Definition eines Steilasts (rechts) sowie eines Zwiesels (links). ....	111
Abbildung 30: Anspracheschlüssel zur gutachterlichen Qualitätsbeurteilung von Schaft- und Kronenform der Buchen. Aus der Kombination beider separat angesprochenen Merkmale ergibt sich die Qualitätsklasse des Baums. Anspracheschlüssel nach LEONHARDT & WAGNER (2006) in Anlehnung an GÖCKEL (1994) und FISCHER (2000). Abbildung in Anlehnung an HERTRAMPF (2009).....	112
Abbildung 31: Anzahl der pro Buche gebildeten Zwiesel in Abhängigkeit von der Pflanzenzahl pro Hektar, getrennt nach Entwicklungsstadium und Überschirmung.....	119
Abbildung 32: Relativer Anteil der Buchen mit einem Tiefzwiesel (Ansatzhöhe: < 3,0 m) in Abhängigkeit von der Pflanzenzahl pro Hektar, getrennt nach Entwicklungsstadium und Überschirmung. ....	120

Abbildung 33: Modellvorhersage für die relativen Anteile der vier Qualitätsklassen in Abhängigkeit von der Pflanzenzahl pro Hektar des Voranbaus. Die Darstellung erfolgt separat für Voranbauten unter Fichtenschirm (links) sowie auf Freiflächen (rechts). Die Ergebnisse gelten unabhängig vom Entwicklungsstadium der Voranbauten. ....	120
Abbildung 34: Modellvorhersage zur Wahrscheinlichkeitsverteilung der vier Qualitätsklassen in Abhängigkeit von ASIX, Zwieselzahl pro Buche (Spalten) und Astwinkel (Zeilen). ....	123
Abbildung 35: Grafische Veranschaulichung der Korrelation zwischen beobachteter und durch das Modell aus ASIX, Astwinkel und Zwieselzahl vorhergesagter Qualitätsklasse der Buchen. Die Breite der Balken beschreibt die relative Häufigkeit der beobachteten Qualitätsklassen. ....	124
Abbildung 36: Anzahl potenzieller Z-Baum-Anwärter pro Hektar Voranbaufläche in Abhängigkeit von der Pflanzendichte im Voranbau sowie der Überschirmungssituation. Die Modellergebnisse gelten unabhängig vom Entwicklungsstadium der Voranbauten. ....	125
Abbildung 37: Ergebnisse der Kontrollmessung des 30-m-Rasters auf den Versuchsflächen. Die Darstellung erfolgt getrennt für Flächen ohne bzw. mit Fichtenschirm. ....	151
Abbildung 38: Stammscheiben zweier Buchen. Links: dauerhaft überschirmte Buche mit gleichmäßigem Jahrringbau. Rechts: sturmbedingt freigestellte Buche mit deutlich erkennbarem, sofortigem und intensivem Anstieg der Jahrringbreite. ....	157



## 12 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Klimatische und geologische Charakterisierung der im sächsischen Untersuchungsgebiet auftretenden Wuchsbezirke. Nach SCHWANECKE & KOPP (1996). .....	8
Tabelle 2: Klimatische und geologische Charakterisierung der im thüringischen Untersuchungsgebiet auftretenden (Teil-)Wuchsbezirke. Nach LAWUF (1997).....	12
Tabelle 3: Standörtliche Vorgaben für die Versuchsflächenauswahl. ....	17
Tabelle 4: Ertragskundliche Kennzahlen für die Versuchsflächenauswahl. Die Altersangaben sind auf das Jahr 2012 fortgeschrieben. Baumartenanteil und Bestockungsgrad des Oberstands beziehen sich bei Beständen mit Schirmverlust auf den Zeitpunkt vor KYRILL. ....	18
Tabelle 5: Im Rahmen der Flächenbesichtigung angesprochene bzw. von den Revierleitern erfragte Daten. ....	23
Tabelle 6: Klimatische und standörtliche Charakterisierung der Versuchsflächen. Angaben zur Höhenlage nach digitalem Geländemodell, DGM 200 (GDZ 2015). Die Temperatur- und Niederschlagsangaben sind interpolierte Rasterdaten zur Normalperiode 1981–2010 (REKIS 2015b). Die Vegetationszeitlängen in Tagen pro Jahr beziehen sich für die Modellregion Thüringen auf die Periode 1971–2000 (TLWJF 2011). Für das sächsische Untersuchungsgebiet lagen Rasterdaten für die Klimaperiode 1981–2010 vor (REKIS 2015a). ....	29
Tabelle 7: Charakterisierung der Bestockung auf den 29 Versuchsflächen im Jahr der Datenaufnahme 2012. Nur das Entwicklungsstadium (Dickungsschluss) ist auf den Zeitpunkt des Schirmverlusts bezogen. Für geworfene Fichtenschirme ist der Zustand vor KYRILL angegeben (Angaben in Klammern). Die Bestockungsangaben entstammen den Forsteinrichtungswerken (SACHSENFORST 2012; THÜRINGENFORST 2012). Höhe und Dickungsschluss der Voranbauten wurden eigenständig erfasst. Falls verfügbar, wurden Herkunftsgebiet und Pflanzensortiment den Vollzugsdaten entnommen (SACHSENFORST 2014; THÜRINGENFORST 2014). Gleiches gilt für die Pflanzenzahlen pro ha, welche nur bei mangelnder Datenlage eigenständig rekonstruiert wurde (Kennzeichnung *). ....	30
Tabelle 8: Einteilung der Signifikanzniveaus bei statistischen Tests nach KÖHLER ET AL. (2002). ....	40
Tabelle 9: Übersicht über die erhobenen Wachstumsgrößen und deren Aufnahmemethodik. 56	
Tabelle 10: Deskriptive Statistik zu den nach Abschluss der Vegetationszeit 2006 erreichten Buchenhöhen. Die Werte ergeben sich aus den im Herbst 2012 erhobenen Höhen abzüglich der für die Jahre 2007–2012 zurückgemessenen Haupttrieblängen. ....	64
Tabelle 11: Ergebnisse der linearen gemischten Modelle (LMM) zur Schätzung der Wachstumsgrößen der Buchen in Abhängigkeit von Schirm, Pflanzenzahl und Entwicklungsstadium des Voranbaus. Das Intercept bezieht sich auf freigestellte Voranbauten vor Dickungsschluss. ....	65
Tabelle 12: Ergebnisse des linearen gemischten Modells (LMM) zur Schätzung der jährlichen Haupttrieblänge der Buchen in der Periode 2005–2012 in Abhängigkeit von Schirm,	

Pflanzenzahl und Entwicklungsstadium des Voranbaus (Formel 11). Das Intercept bezieht sich auf freigestellte Voranbauten vor Dichtungsschluss.....	69
Tabelle 13: Ergebnisse des linearen gemischten Modells (LMM) zur Schätzung der Jahrringbreiten an Stamm und stärkstem Grünast der Buchen in der Periode 2000–2013 in Abhängigkeit von Schirm, Pflanzenzahl und Entwicklungsstadium des Voranbaus (Formel 12). Das Intercept bezieht sich auf freigestellte Voranbauten im Entwicklungsstadium vor Dichtungsschluss. Die Modellschätzungen sind Box-Cox transformiert. ....	71
Tabelle 14: Übersicht über die erhobenen qualitätsbezogenen Astparameter, deren Definition und Erhebungsmethoden. In Anlehnung an BÖRNER ET AL. (2003). ....	89
Tabelle 15: Ergebnisse der linearen gemischten Modelle (LMM) zur Schätzung der qualitätsbezogenen Grünastparameter in Abhängigkeit von Schirm, Pflanzenzahl und Entwicklungsstadium des Voranbaus. Das Intercept bezieht sich auf freigestellte Voranbauten vor Dichtungsschluss.....	92
Tabelle 16 Ergebnisse der gemischten Modelle zur Schätzung der Totastparameter und der Astreinigung der Buchen in Abhängigkeit von Schirm, Pflanzenzahl und Entwicklungsstadium des Voranbaus. Der jeweils angewendete Modelltyp (LMM, GLMM) ist ausgewiesen. Das Intercept bezieht sich auf freigestellte Voranbauten vor Dichtungsschluss. ....	96
Tabelle 17: Kategorien der Schaft- und Kronenform sowie deren Grenzwerte bei der gutachterlichen Qualitätsansprache der Buchen. Nach LEONHARDT (2006).....	113
Tabelle 18: Ergebnisse der generalisierten linearen gemischten Modelle (GLMM) zur Schätzung der Steilast- und Zwieselmerkmale der Buchen in Abhängigkeit von Schirm, Pflanzenzahl und Entwicklungsstadium des Voranbaus. Das Intercept bezieht sich auf freigestellte Voranbauten vor Dichtungsschluss. ....	118
Tabelle 19: Ergebnisse der Proportional Odds Logistic Regression (POLR) zur Schätzung der relativen Anteile der vier Qualitätsklassen in Abhängigkeit von Schirm und Pflanzenzahl pro Hektar des Voranbaus. Die Intercepts sind als „Cutpoints“ zwischen den Qualitätsklassen zu verstehen. Die Odds Ratio gibt die Relation der Wahrscheinlichkeiten an, dass eine höhere statt einer geringeren Qualitätsklasse erreicht wird, wenn sich der erklärende Parameter um eine Einheit erhöht. Die Intercepts beziehen sich auf freigestellte Voranbauten.....	121
Tabelle 20: Ergebnisse der Proportional Odds Logistic Regression (POLR) zur Schätzung der Wahrscheinlichkeitsverteilung der vier Qualitätsklassen in Abhängigkeit von relativem Astdurchmesser (ASIX), mittlerem Astwinkel und Zwieselzahl (Median) einer Buche. Die Intercepts sind als „Cutpoints“ zwischen den Qualitätsklassen zu verstehen. Die Odds Ratio gibt die Relation der Wahrscheinlichkeiten an, dass eine Buche eine höhere statt einer geringeren Qualitätsklasse erreicht, wenn sich der erklärende Parameter um eine Einheit erhöht. Die Intercepts beziehen sich auf freigestellte Voranbauten. ....	122
Tabelle 21: Metrische Charakterisierung einer für jeweils eine der vier Qualitätsklassen repräsentativen Buche anhand des POLR-Modells aus ASIX, Astwinkel und Zwieselzahl (Tabelle 20). Angegeben sind der arithmetische Mittelwert der erklärenden Größen sowie die zugehörige Standardabweichung (SD) innerhalb der Klassen. Zudem ist die Eintrittswahrscheinlichkeit jeder Qualitätsklasse bei der zugrunde gelegten Merkmalskombination angegeben. ....	124

Tabelle 22: Ergebnisse des generalisierten linearen gemischten Modells zur Schätzung der Anzahl von Z-Baum-Anwärtern pro Hektar in Abhängigkeit von Pflanzendichte und Überschirmungssituation des Voranbaus. Das Intercept bezieht sich auf freigestellte Voranbauten. ....	125
--	-----

## 13 Literaturverzeichnis

- ABETZ, P. (1974): Zur Standraumregulierung in Mischbeständen und Auswahl von Zukunftsbäumen. In: *Allgemeine Forstzeitschrift* 29, S. 871–873.
- ABETZ, P. (1979): Brauchen wir „Durchforstungshilfen“? In: *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* 130 (11), S. 945–963.
- ABETZ, P. (1989): Zu den Ursachen des „Umsetzens“ von (Z-)Bäumen. In: *AFZ-Der Wald* 44 (50), S. 1334–1337.
- AGRESTI, A. (2002): *Categorical Data Analysis*. 2. Auflage. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons.
- ALBERT, M.; SCHMIDT, M.: Dynamik der Standort-Leistungs-Beziehungen von Buche, Eiche, Fichte und Douglasie unter Klimaveränderungen in Deutschland. Jahrestagung der Sektion Ertragskunde des DVFFA. Möhnesee-Körbecke.
- ALBRECHT, A. (2009): Sturmschadensanalysen langfristiger waldwachstumskundlicher Versuchsflächendaten in Baden-Württemberg. Dissertation. Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg i. Br.
- ALBRECHT, A.; HANEWINKEL, M.; BAUHUS, J.; KOHNLE, U. (2012): How does silviculture affect storm damage in forests of south-western Germany? Results from empirical modeling based on the long-term observation. In: *European Journal of Forest Research* 131, S. 229–247.
- AMMER, C. (1996): Konkurrenz um Licht – Zur Entwicklung der Naturverjüngung im Bergmischwald. Schriftenreihe der Forstwissenschaftlichen Fakultät der Universität München und der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft. LMU München, Lehrstuhl für Waldbau und Forsteinrichtung.
- AMMER, C. (2000): Untersuchungen zum Einfluss von Fichtenreinbeständen auf die Entwicklung junger Buchen. Aachen: Shaker.
- AMMER, C. (2003): Growth and biomass partitioning of *Fagus sylvatica* L. and *Quercus robur* L. seedlings in response to shading and small changes in the R/FR-ratio of radiation. In: *Annals of Forest Science* 60 (2), S. 163–171.
- AMMER, C.; BICKEL, E.; KÖLLING, C. (2008a): Converting Norway spruce stands with beech – a review of arguments and techniques. In: *Austrian Journal of Forest Science* 125 (1), S. 3–26.
- AMMER, C.; BRANG, P.; KNOKE, T.; WAGNER, S. (2004): Methoden zur waldbaulichen Untersuchung von Jungwüchsen. In: *Forstarchiv* 75, S. 83–110.
- AMMER, C.; STIMM, B.; MOSANDL, R. (2008b): Ontogenetic variation in the relative influence of light and belowground resources on European beech seedling growth. In: *Tree Physiology* 28, S. 721–728.
- AMMER, C.; ZIEGLER, C.; KNOKE, T. (2005): Zur Beurteilung von intra- und interspezifischer Konkurrenz von Laubbaumbeständen im Dickungsstadium. In: *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 176 (5), S. 85–94.
- AMMON, W. (1995): Das Plenterprinzip in der Waldwirtschaft – Folgerungen aus 40 Jahren schweizerischer Praxis. 4. Auflage. Bern: Paul Haupt.

- ARANDA, I.; BERGASA, L. F.; GIL, L.; PARDOS, J. (2001): Effects of relative irradiance on the leaf structure of *Fagus sylvatica* L. seedlings planted in the understory of a *Pinus sylvestris* L. stand after thinning. In: *Annals of Forest Science* 58, S. 673–680.
- ARENHÖVEL, W. (1996): Waldumbau als Bestandteil des naturnahen Waldbaus – Waldumbauprogramm für ganz Thüringen. In: *AFZ-Der Wald* 51 (9), S. 486–488.
- ARENHÖVEL, W. (2007): Die Fichte in Thüringen. Tangungsband zum Kolloquium „Zukunftsorientierte Fichtenwirtschaft“. In: *Mitteilungen aus der Thüringer Landesanstalt für Wald, Jagd und Fischerei* (28), S. 4–19.
- AUSSENAC, G. (2000): Interactions between forest stands and microclimate: Ecophysiological aspects and consequences for silviculture. In: *Annals of Forest Science* 57, S. 287–301.
- BARBEITO, I.; COLLET, C.; NINGRE, F. (2014): Crown responses to neighbor density and species identity in a young mixed deciduous stand. In: *Trees* 28, S. 1751–1765.
- BARNA, M.; SCHIEBER, B.; CÍČÁK, A. (2009): Effects of post-cutting changes in site conditions on the morphology and phenology of naturally regenerated beech seedlings (*Fagus sylvatica* L.). In: *Polish Journal of Ecology* 57 (3), S. 461–472.
- BASTIAN, O. (2008): Potenzielle natürliche Vegetation. In: K. MANNSFELD und R.-U. SYRBE (Hg.): *Naturräume in Sachsen. Forschungen zur deutschen Landeskunde*, 257. Leipzig: Selbstverlag der Deutschen Akademie für Landeskunde, S. 38–43.
- BAUMGARTEN, M.; TEUFFEL, K. VON (2005): Nachhaltige Waldwirtschaft in Deutschland. In: K. VON TEUFFEL, M. BAUMGARTEN, M. HANEWINKEL, W. KONOLD, U. H. SAUTER, H. SPIECKER und K. VON WILPERT (Hg.): *Waldumbau. Für eine zukunftsorientierte Waldwirtschaft – Ergebnisse aus dem Südschwarzwald*. Berlin/Heidelberg: Springer, S. 1–10.
- BAYERISCHE STAATSFORSTEN (2009): Richtlinie Bewirtschaftung von Fichten- und Fichtenmischbeständen im Bayerischen Staatswald. WNJF-RL-001 „Fichtenrichtlinie“, Version 01.00. Regensburg.
- BEAUDET, M.; BRISSON, J.; GRAVEL, D.; MESSIER, C. (2007): Effect of a major canopy disturbance on the coexistence of *Acer saccharum* and *Fagus grandifolia* in the understory of an old-growth forest. In: *Journal of Ecology* 95, S. 458–467.
- BEAUDET, M.; MESSIER, C. (1998): Growth and morphological responses of yellow birch, sugar maple, and beech seedlings growing under a natural light gradient. In: *Canadian Journal of Forest Research* 28 (7), S. 1007–1015.
- BENISTON, M.; STEPHENSON, D. B.; CHRISTENSEN, O. B.; FERRO, C. A. T.; FREI, C.; GOYETTE, S.; HALSNAES, K.; HOLT, T.; JYLHÄ, K.; KOFFI, B.; PALUTIKOF, J.; SCHÖLL, R.; SEMMLER, T.; WOTH, K. (2007): Future extreme events in European climate – An exploration of regional climate model projections. In: *Climate Change* 81, S. 71–95.
- BERGERS, C.; FRANK, A.; KAISER, H. (2006): Voranbauten von Buche und Eiche unter Kiefern. In: *AFZ-Der Wald* 61 (9), S. 482–484.
- BMELF (1994): Verordnung über Herkunftsgebiete für forstliches Vermehrungsgut (Forstsaat-Herkunftsverordnung). Verordnung des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten. Drucksache 511/94. Bonn: Bundesanzeiger Verlagsgesellschaft mbH.
- BOLKER, B. M.; BROOKS, M. E.; CLARK, C. J.; GEANGE, S. W.; POULSEN, J. R.; STEVENS, M. H. H.; WHITE, J. S. S. (2008): Generalized linear mixed models – A practical guide for ecology and evolution. In: *Trends in Ecology and Evolution* 24 (3), S. 127–135.

- BONTEMPS, J.-D.; HERVÉ, J.-C.; DHÔTE, J.-F. (2010): Dominant radial and height growth reveal comparable historical variations for common beech in north-eastern France. In: *Forest Ecology and Management* 259 (8), S. 1455–1463.
- BÖRNER, M.; GUERICKE, M.; LEDER, B.; NUTTO, L.; WEINREICH, A. (2003): Erhebung qualitätsrelevanter Parameter am Einzelstamm – Aufnahmestandards für junge bis mittelalte Laubhölzer als Grundlage für wissenschaftliche Untersuchungen. In: *Forstarchiv* 74, S. 275–282.
- BORTZ, J. (1993): Statistik für Sozialwissenschaftler. 4., vollständig überarbeitete Auflage. Berlin/Heidelberg: Springer.
- BOWMAN, D. M. J. S.; BRIENEN, R. J. W.; GLOOR, E.; PHILLIPS, O. L.; PRIOR, L. D. (2013): Detecting trends in tree growth – not so simple. In: *Trends in Plant Science* 18 (1), S. 11–17.
- BRADSHAW, R. H. W. (2005): What is a natural forest? In: J. A. STANTURF und P. MADSEN (Hg.): Restoration of boreal and temperate forests. Integrative Studies in Water Management and Land Development. Boca Raton: CRC Press, S. 15–30.
- BRAUN, H. (2012): Jahresbilanz 2011. Sachsenforst – Leistungsstark und zukunftsorientiert. Hg. v. Sachsenforst. Graupa.
- BRÄUNIG, R.; DIETER, M. (1999): Waldumbau, Kalamitätsrisiken und finanzielle Erfolgskennzahlen – Eine Anwendung von Simulationsmodellen auf Daten eines Forstbetriebes. Schriften zur Forstökonomie, 18. Frankfurt a. M.: J. D. Sauerländer's.
- BRESHEARS, D. D.; RICH, P. M.; BARNES, F. J.; CAMPBELL, K. (1997): Overstory-imposed heterogeneity in solar radiation and soil moisture in a semiarid woodland. In: *Ecological Applications* 7 (4), S. 1201–1215.
- BRESLOW, N. (2004): Whither PQL? In: D. Y. LIN und P. J. HEAGERTY (Hg.): Proceedings of the Second Seattle Symposium in Biostatistics. Analysis of Correlated Data. Lecture Notes in Statistics, 179. New York: Springer, S. 1–22.
- BRIENEN, R. J. W.; GLOOR, E.; ZUIDEMA, P. A. (2012): Detecting evidence for CO<sub>2</sub> fertilization from tree ring studies – The potential role of sampling biases. In: *Global Biogeochemical Cycles* 26 (GB1025), S. 1–13.
- BROWN, J. M. B. (1952): Influence of shade on the height growth and habit of beech. In: *Report on Forest Research*, S. 62–67.
- BRUNNER, A.; HUSS, J. (1994): Die Entwicklung von Bergmischwaldkulturen in den Chiemgauer Alpen. In: *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 113, S. 194–203.
- BURSCHEL, P.; EL KATEB, H.; HUSS, J.; MOSANDL, R. (1985): Die Verjüngung im Bergmischwald – Erste Ergebnisse einer Untersuchung in den ostbayerischen Kalkalpen. In: *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 104, S. 65–100.
- BURSCHEL, P.; HUSS, J. (2003): Grundriss des Waldbaus. 3., unveränderte Auflage. Stuttgart: Eugen Ulmer.
- BURSCHEL, P.; SCHMALTZ, J. (1965a): Die Bedeutung des Lichtes für die Entwicklung junger Buchen. In: *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 136 (9), S. 193–210.
- BURSCHEL, P.; SCHMALTZ, J. (1965b): Untersuchungen über die Bedeutung von Unkraut- und Altholzkonkurrenz für junge Buchen. In: *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 84, S. 230–243.
- BÜSGEN, M. (1927): Bau und Leben unserer Waldbäume. 3., neu bearbeitet und vermehrte Auflage. Jena: Gustav Fischer.



- BUSHART, M.; SUCK, R. (2008): Potenzielle natürliche Vegetation Thüringens. Unter Mitarbeit von U. BOHN, G. HOFMANN, H. SCHLÜTER, H. SCHRÖDER, W. TÜRK und W. WESTHUS. CD zur Schriftenreihe der Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie, 78. Jena.
- BUTTER, D. (2001): 10 Jahre Waldumbau in Sachsen. In: *AFZ-Der Wald* 56 (19), S. 995–997.
- CANHAM, C. D. (1988): Growth and canopy architecture of shade-tolerant trees – Response to canopy gaps. In: *Ecology* 69 (3), S. 786–795.
- CANHAM, C. D. (1989): Different responses to gaps among shade-tolerant tree species. In: *Ecology* 70 (3), S. 548–550.
- CANHAM, C. D. (1990): Suppression and release during canopy recruitment in *Fagus grandifolia*. In: *Bulletin of Torrey Botanical Club* 117 (1), S. 1–7.
- CAO, K.-F. (2001): Morphology and growth of deciduous and evergreen broadleaved saplings under different light conditions in a Chinese beech forest with dense bamboo undergrowth. In: *Ecological Research* 16, S. 509–517.
- CAQUET, B.; MONTPIED, P.; DREYER, E.; EPRON, D.; COLLET, C. (2010): Response to canopy opening does not act as a filter to *Fagus sylvatica* and *Acer* sp. advance regeneration in a mixed temperate forest. In: *Annals of Forest Science* 67 (105, online veröffentlicht).
- CARLSON, D. W.; GROOT, A. (1997): Microclimate of clear-cut, forest interior, and small openings in trembling aspen forest. In: *Agricultural and Forest Meteorology* 87, S. 313–329.
- CHAAR, H.; COLIN, F. (1999): Impact of late frost on height growth in young sessile oak regenerations. In: *Annals of Forest Science* 56, S. 417–429.
- CHMURA, D. J.; ROZKOWSKI, R. (2002): Variability of beech provenances in spring and autumn phenology. In: *Silvae Genetica* 51 (2–3), S. 123–127.
- CHRISTENSEN, R. H. B. (2013): Analysis of ordinal data with cumulative models – Estimation with the R-package ordinal. Online verfügbar unter: [https://cran.r-project.org/web/packages/ordinal/vignettes/clm\\_intro.pdf](https://cran.r-project.org/web/packages/ordinal/vignettes/clm_intro.pdf), zuletzt aktualisiert am 30.09.2013, zuletzt geprüft am 13.05.2014.
- CLASEN, C.; FRISCHBIER, N.; ZEHNER, T. (2008): Ursachenanalyse zum Schadausmaß des Sturmes „Kyrill“ in Thüringen. In: *AFZ-Der Wald* 63 (14), S. 746–748.
- COLLET, C.; CHENOST, C. (2006): Using competition and light estimates to predict diameter and height growth of naturally regenerated beech seedlings growing under changing canopy conditions. In: *Forestry* 79 (5), S. 489–502.
- COLLET, C.; FOURNIER, M.; NINGRE, F.; HOUNZANDJI, A. P.-I.; CONSTANT, T. (2011): Growth and posture control strategies in *Fagus sylvatica* and *Acer pseudoplatanus* saplings in response to canopy disturbance. In: *Annals of Botany* 107, S. 1345–1353.
- COLLET, C.; LANTER, O.; PARDOS, M. (2001): Effects of canopy opening on height and diameter growth in naturally regenerated beech seedlings. In: *Annals of Forest Science* 58 (2), S. 127–134.
- COLLET, C.; LANTER, O.; PARDOS, M. (2002): Effects of canopy opening on the morphology and anatomy of naturally regenerated beech seedlings. In: *Trees* 16 (4–5), S. 291–298.
- COLLET, C.; PIBOULE, A.; LEROY, O.; FROCHOT, H. (2008): Advanced *Fagus sylvatica* and *Acer pseudoplatanus* seedlings dominate tree regeneration in a mixed broadleaved former coppice-with-standards forest. In: *Forestry* 81, S. 135–150.

- CURT, T.; COLL, L.; PREVOSTO, B.; BALANDIER, P.; KUNSTLER, G. (2005): Plasticity in growth, biomass allocation and root morphology in beech seedlings as induced by irradiance and herbaceous competition. In: *Annals of Forest Science* 62 (1), S. 51–60.
- DAMMANN, I.; KUHR, M.; FRIEDHOFF, T.; PAAR, U.; EICHHORN, J. (2009): Methoden zur Vermessung der Triebblängen von Buche und Eiche. In: *Forst und Holz* 64 (10), S. 26–31.
- DEBELJAK, M.; MLINSEK, D. (1998): Die Buche (*Fagus sylvatica* L.) und ihr Reaktionsvermögen. In: *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* 149 (2), S. 71–86.
- DIACI, J.; KOZJEK, L. (2005): Beech sapling architecture following small and medium gap disturbances in silver fir-beech old-growth forests in Slovenia. In: *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* 156 (12), S. 481–486.
- DITTMAR, C.; ELLING, W. (1999): Jahrringbreite von Fichte und Buche in Abhängigkeit von Witterung und Höhenlage. In: *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 118, S. 251–270.
- DITTMAR, C.; ZECH, W.; ELLING, W. (2003): Growth variations of common beech (*Fagus sylvatica* L.) under different climatic and environmental conditions in Europe – A dendroecological study. In: *Forest Ecology and Management* 173, S. 63–78.
- DOBBERTIN, M. (2002): Influence of stand structure and site factors on wind damage comparing the storms Vivian and Lothar. In: *Forest Snow and Landscape Research* 77 (1–2), S. 187–205.
- DOBBERTIN, M.; SEIFERT, H.; SCHWYZER, A. (2002): Ausmaß der Sturmschäden. In: *Wald und Holz* (1), S. 39–42.
- DONG, P. H.; EDER, W.; MUTH, M. (2007): Traubeneichen-Läuterungsversuche im Pfälzerwald. In: P. H. DONG (Hg.): Eiche im Pfälzerwald. Mitteilungen aus der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz, 63. Trippstadt, S. 57–77.
- DORMANN, C. F.; ELITH, J.; BACHER, S.; BUCHMANN, C.; CARL, G.; CARRÉ, G.; GARCÍA MARQUÉZ, J. R.; GRUBER, B.; LAFOURCADE, B.; LEITAO, P. J.; MÜNKEMÜLLER, T.; MCCLEAN, C.; OSBORNE, P. E.; REINEKING, B.; SCHRÖDER, B.; SKIDMORE, A. K.; ZURELL, D.; LAUTENBACH, S. (2013): Collinearity – A review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance. In: *Ecography* 36, S. 27–46.
- DORMANN, C. F.; KÜHN, I. (2012): Angewandte Statistik für die biologischen Wissenschaften. Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ). 2., durchgesehene, aktualisierte, überarbeitete und erweiterte Auflage.
- DRÉNOU, C. (2000): Pruning trees – The problem of forks. In: *Journal of Arboriculture* 26 (5), S. 264–269.
- DSH (Hg.) (2012): Generelle Regeln zur Qualitätssortierung von Stammholz nach der Rahmenvereinbarung für den Rohholzhandel in Deutschland – Sortiertabelle für Buche und Eiche für die Einschlagssaison 2012/13. Hg. vom Deutschen Säge- und Holzindustrie Bundesverband e. V. Berlin.
- DUPRÉ, S.; THIÉBAUT, B.; TEISSIER, E. (1986): Morphologie et architecture des jeunes hêtres (*Fagus sylvatica* L.) – Influence du milieu, variabilité génétique. In: *Annales des Sciences Forestières* 43 (1), S. 85–102.
- DVORAK, L.; BACHMANN, P.; MANDALLAZ, D. (2001): Sturmschäden in ungleichförmigen Beständen. In: *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* 152 (11), S. 445–452.

- DWD (2015): Klimadaten Deutschland – Zeitreihen von Gebietsmitteln. Online verfügbar unter: [http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwww\\_Desktop?\\_nfpb=true&\\_pageLabel=\\_dwdwww\\_klima\\_umwelt\\_klimadaten\\_deutschland&T82002gsbDocumentPath=Navi%20gation%20oeffentlichkeit%20FKlima\\_\\_Umwelt%20FKlimadaten%20Fkldaten\\_\\_kostenfrei%20Fdaten\\_\\_gebietsmittel\\_\\_node.html%3F\\_\\_nnn%3Dtrue](http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwww_Desktop?_nfpb=true&_pageLabel=_dwdwww_klima_umwelt_klimadaten_deutschland&T82002gsbDocumentPath=Navi%20gation%20oeffentlichkeit%20FKlima__Umwelt%20FKlimadaten%20Fkldaten__kostenfrei%20Fdaten__gebietsmittel__node.html%3F__nnn%3Dtrue), zuletzt aktualisiert am 02.03.2015, zuletzt geprüft am 05.03.2015.
- ECKARDT, L.; ARENHÖVEL, W. (2006): Waldbau und Waldumbau in Thüringen – Eine Bilanz nach 15 Jahren. Naturnahe Waldbewirtschaftung. In: *AFZ-Der Wald* 61 (24), S. 1339–1342.
- EICHHORN, J.; DAMMANN, I.; SCHÖNFELDER, E.; ALBRECHT, M.; BECK, W.; PAAR, U. (2008): Untersuchungen zur Trockenheitstoleranz der Buche am Beispiel des witterungsextremen Jahres 2003. In: NW-FVA (Hg.): Ergebnisse angewandter Forschung zur Buche. Beiträge aus der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt, 3. Göttingen, S. 109–134.
- EISENHAUER, D.-R. (2008): Waldbaukonzept und Klimawandel – Staatsbetrieb Sachsenforst. In: *AFZ-Der Wald* 63 (15), S. 814–817.
- EISENHAUER, D.-R.; ROCH, T.; IRRGANG, S.; GEMBALLA, R. (2005): Bestandeszieltypen – Richtlinie für den Staatswald des Freistaates Sachsen. Hg. v. Landesforstpräsidium. Pirna.
- EISENHAUER, D.-R.; SONNEMANN, S. (2008): Waldentwicklungstypen – Grundlage für die Entwicklung regionaler Waldbaurichtlinien. In: *Forst und Holz* 63 (10), S. 12–17.
- EISENHAUER, D.-R.; SONNEMANN, S. (2009): Waldbaustrategien unter sich ändernden Umweltbedingungen – Leitbilder, Zielsystem und Waldentwicklungstypen. In: *Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz* (8), S. 71–88.
- EL KATEB, H.; SCHREYER, A.; MOSANDL, R. (2009): Entwicklung von Forstkulturen auf ehemaligen Schadflächen in den bayerischen Alpen – 18 Jahre lang beobachteter Versuch gibt Antworten zu Aufforstungen im Gebirge. In: *LWF aktuell* (72), S. 52–54.
- ENESCU, V.; MUHS, H.-J. (1988): Introduction to a variability study in beech (*Fagus sylvatica* L.) in Romania. In: S. KORPEL und L. PAULE (Hg.): 3. IUFRO Buchensymposium. Zvolen, S. 85–92.
- ERTELD, W.; ACHTERBERG, W. (1954): Narbenbildung, Qualitätsdiagnose und Ausformung bei der Buche. In: *Archiv für Forstwesen* 3 (7–8), S. 577–619.
- ERTELD, W.; HENGST, E. (1966): Waldertragslehre. Radebeul: Neumann.
- ESCHRICH, W.; BURCHARDT, R.; ESSIAMA, S. (1989): The induction of sun and shade leaves of European beech (*Fagus sylvatica* L.) – Anatomical studies. In: *Trees* 3, S. 1–10.
- EWALD, J. (2007): Ein pflanzensoziologisches Modell der Schattentoleranz von Baumarten in den Bayerischen Alpen. In: *Forum geobotanicum* 3, S. 11–19.
- FABRICIUS, L. (1929): Forstliche Versuche – IV. Erkennung von Ausleseebäumen in Buchenjungwüchsen. In: *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 51, S. 14–20.
- FAHLVIK, N.; EKÖ, P.-M.; PETTERSSON, N. (2005): Influence of precommercial thinning grade on branch diameter and crown ratio in *Pinus sylvestris* in southern Sweden. In: *Scandinavian Journal of Forest Research* 20 (3), S. 243–251.
- FARAWAY, J. J. (2006): Extending the linear model with R – Generalized linear, mixed effects and nonparametric regression models. Texts in Statistical Science. Boca Raton: Chapman & Hall/CRC.
- FINDEISEN, H. F. (2015): Morphologische Anpassung vorangebauter Rotbuche (*Fagus sylvatica* L.) nach abruptem Verlust des Fichtenschirms – Eine empirische Untersuchung der

Ast- und Blattstruktur. Bachelorarbeit. TU Dresden, Tharandt, Lehrstuhl für Waldbau und Waldschutz.

FISCHER, H. (2000): Qualitätsverbesserung bei jungen Traubeneichen (*Quercus petraea* LIEBL.) allein durch innerartliche Konkurrenz. In: *Forst und Holz* 55 (12), S. 377–382.

FISICHELLI, N.; VOR, T.; AMMER, C. (2014): Broadleaf seedlings responses to warmer temperatures „chilled“ by late frost that favors conifers. In: *European Journal of Forest Research* 133, S. 587–596.

FITZMAURICE, G. N.; LAIRD, N. M.; WARE, J. (2011): Applied longitudinal analysis. Wiley Series in Probability and Statistics. Hoboken, New Jersey: Wiley & Sons.

FLEDER, W. (1990): Zur Z-Baum-Diskussion. In: *AFZ-Der Wald* 45 (32), S. 828–830.

FREIST, H. (1980): Beitrag zur Frage der Stammzahlhaltung am Beispiel eines Buchenjungbestandes im Bramwald. In: *Forst- und Holzwirt* 35 (2), S. 21–22.

FRISCHBIER, N.; ARENHÖVEL, W.; HÄGER, U.; HEER, W.; KAHLERT, K.; RÖSNER, C.; SIMON, I. (2014): Waldverjüngung im Landeswald von ThüringenForst. Forstliches Vermehrungsgut in Thüringen. In: *AFZ-Der Wald* 69 (19), S. 15–18.

FRISCHBIER, N.; PROFFT, I. (2008): Praxisorientierte Regionalisierung forstlich relevanter Klimawerte und -szenarien für Thüringen. In: *Forst und Holz* 63 (10), S. 24–29.

FRISCHBIER, N.; PROFFT, I.; ARENHÖVEL, W. (2010): Die Ausweisung klimawandelangepasster Bestandeszieltypen für Thüringen. In: *Forst und Holz* 65 (2), S. 28–35.

FRISCHBIER, N.; PROFFT, I.; ARENHÖVEL, W. (2011): Anpassung der Thüringer Baumartenzusammensetzung an den Klimawandel (Poster). In: W. D. MAURER und B. HAASE (Hg.): Holzproduktion auf forstgenetischer Grundlage im Hinblick auf Klimawandel und Rohstoffverknappung. 28. Internationale Tagung der Arbeitsgemeinschaft (ARGE) für Forstgenetik und Forstpflanzenzüchtung. Treis-Karden, 2009. Mitteilungen aus der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz, 69/11. Hg. v. Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Ernährung, Weinbau und Forsten. Trippstadt., S. 161–165.

FUJIMORI, T. (2001): Ecological and silvicultural strategies for sustainable forest management. Amsterdam: Elsevier.

GDZ (2015): Digitales Geländemodell Gitterweite 200 m. Geodatendownload im Format GRID-ASCII. Bundesamt für Kartografie und Geodäsie, Geodatenzentrum. Leipzig. Online verfügbar unter: [http://www.geodatenzentrum.de/geodaten/gdz\\_rahmen.gdz\\_div?gdz\\_spr=deu&gdz\\_akt\\_zeile=5&gdz\\_anz\\_zeile=1&gdz\\_unt\\_zeile=3&gdz\\_user\\_id=0](http://www.geodatenzentrum.de/geodaten/gdz_rahmen.gdz_div?gdz_spr=deu&gdz_akt_zeile=5&gdz_anz_zeile=1&gdz_unt_zeile=3&gdz_user_id=0), zuletzt aktualisiert am 30.01.2015, zuletzt geprüft am 30.01.2015.

GEMBALLA, R.; SCHLUTOW, A. (2007): Überarbeitung der forstlichen Klimagliederung Sachsens – Klimawandel und Forstwirtschaft. In: *AFZ-Der Wald* 62 (15), S. 822–825.

GEROLD, D. (1996): Empfehlungen für den Waldumbau im Mittelgebirge auf der Grundlage von Bestandeszieltypen. In: LAF (Hg.): Waldumbau. Beiträge zum Kolloquium. Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Forsten, 6. Graupa, S. 118–140.

GOCKEL, H. A. (1994): Soziale und qualitative Entwicklungen sowie Z-Baumhäufigkeiten in Eichenjungbeständen – Die Entwicklung eines neuen Pflanzschemas „Die Trupppflanzung“. Dissertation. Universität Göttingen.



- GRALLA, T.; MÜLLER-USING, T.; UNDEN, T.; WAGNER, S. (1997): Über die Lichtbedürftigkeit von Buchenvoranbauten in Fichtenbeständen des Westharzes. In: *Forstarchiv* 68, S. 51–58.
- GRIESS, V. C.; ACEVEDO, R.; HÄRTL, F.; STAUPENDAHL, K.; KNOKE, T. (2012): Does admixing tree species enhance stand resistance against natural hazards? A case study for spruce. In: *Forest Ecology and Management* 267, S. 284–296.
- GRIESS, V. C.; KNOKE, T. (2011): Growth performance, windthrow, and insects: meta-analysis of parameters influencing performance of mixed-species stands in boreal and northern temperate biomes. Review. In: *Canadian Journal of Forest Research* 41, S. 1141–1159.
- GRIESS, V. C.; KNOKE, T. (2013): Bioeconomic modeling of mixed Norway spruce-European beech stands – Economic consequences of considering ecological effects. In: *European Journal of Forest Research* 132, S. 511–522.
- GRUBER, F. (1997): Kombinierte Altersbestimmung von Jungbuchen. In: *AFZ-Der Wald* 52 (5), S. 250–252.
- GRUBER, F. (1998): Kombinierte Altersbestimmung und Altersentwicklung von Jungbuchen – *Fagus sylvatica* L. – nach morphologischen und anatomischen Merkmalen. In: *Flora* 193, S. 59–73.
- HAASE, G.; MANNSFELD, K. (2008): Mulde-Lösshügelland. In: K. MANNSFELD und R.-U. SYRBE (Hg.): *Naturräume in Sachsen. Forschungen zur deutschen Landeskunde*, 257. Leipzig: Selbstverlag der Deutschen Akademie für Landeskunde, S. 141–148.
- HAGEMANN, U. (2005): Quality aspects of natural regeneration in gaps in two sugar maple-yellow birch forest stands in Québec, Canada. TU Dresden, Tharandt, Lehrstuhl für Waldbau und Forstschutz.
- HAGEMANN, U.; VAN DER KELEN, G.; WAGNER, S. (2013): Comparative assessment of natural regeneration quality in two northern hardwood stands. In: *Northern Journal of Applied Forestry* 30 (1), S. 5–15.
- HAMM, T.; WEIDIG, J.; HUTH, F.; KUHLSCH, W.; WAGNER, S. (2014): Wachstumsreaktionen junger Weißtannen-Voraussaaten auf Begleitvegetation und Strahlungskonkurrenz. In: *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 185 (3–4), S. 45–59.
- HANSEN, J. K.; JORGENSEN, B. B.; STOLTZE, P. (2003): Variation of quality and predicted economic returns between European beech (*Fagus sylvatica* L.) provenances. In: *Silvae Genetica* 52 (5–6), S. 185–197.
- HANSEN, J.; SPIECKER, H. (2005): Conversion of Norway spruce [*Picea abies* (L.) KARST.] forests in Europe. In: J. A. STANTURF und P. MADSEN (Hg.): *Restoration of boreal and temperate forests. Integrative Studies in Water Management and Land Development*. Boca Raton: CRC Press, S. 339–347.
- HEDDERICH, J.; SACHS, L. (2012): *Angewandte Statistik – Methodensammlung mit R*. 14., überarbeitete und ergänzte Auflage. Heidelberg: Springer Gabler.
- HEIN, S. (2007): Ansätze zur Modellierung der Überwallung und inneren Ästigkeit bei Buche (*Fagus sylvatica* L.). In: J. NAGEL (Hg.): *Deutscher Verband forstlicher Forschungsanstalten, Sektion Ertragskunde. Beiträge zur Jahrestagung 2010 in Körbecke am Möhnesee (NRW)*. Göttingen, S. 17–28.
- HEIN, S. (2008): Knot attributes and occlusion of naturally pruned branches of *Fagus sylvatica*. In: *Forest Ecology and Management* 256, S. 2046–2057.

- HEIN, S.; LENK, E.; KLÄDTKE, J.; KOHNLE, U. (2007a): Z-Baum orientierte Auslesedurchforstung in Buche (*Fagus sylvatica* L.) – Auswirkungen auf Qualität, Sortenstruktur und Wertleistung. In: *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 178 (1), S. 8–20.
- HEIN, S.; MÄKINEN, H.; YUE, C.; KOHNLE, U. (2007b): Modelling branch characteristics of Norway spruce from wide spacings in Germany. In: *Forest Ecology and Management* 242, S. 155–164.
- HEIN, S.; SPIECKER, H. (2007): Comparative analysis of occluded branch characteristics for *Fraxinus excelsior* and *Acer pseudoplatanus* with natural and artificial pruning. In: *Canadian Journal of Forest Research* 37, S. 1414–1426.
- HEIN, S.; WEISKITTEL, A. R.; KOHNLE, U. (2008): Effect of wide spacing on tree growth, branch and sapwood properties of young Douglas-fir [*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco] in south-western Germany. In: *European Journal of Forest Research* 127, S. 481–493.
- HENGST, E. (1964): Der Kronenbau der Buche im Erzgebirge. In: *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 83, S. 79–87.
- HENRIKSSON, J. (2001): Differential shading of branches or whole trees – Survival, growth, and reproduction. In: *Oecologia* 126, S. 482–486.
- HERING, S.; EISENHAUER, D.-R.; IRRGANG, S. (1999): Waldumbau auf Tieflands- und Mittelgebirgsstandorten in Sachsen – Forschungsergebnisse der Sächsischen Landesanstalt für Forsten 1991-1998. Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Forsten, 19. Graupa.
- HERTRAMPF, J. (2009): Einfluss der Überschirmung durch einen Fichtenaltbestand auf die bisherige Entwicklung eines 13-jährigen Buchen-Voranbaus im Tharandter Wald. Diplomarbeit. TU Dresden, Tharandt, Lehrstuhl für Waldbau und Forstschutz.
- HEUKAMP, B. (1999): Buchenbestände aus extremen Weitverbänden. In: *Forst und Holz* 54 (10), S. 302–304.
- HIEKEL, W.; FRITZLAR, F.; NÖLLERT, A.; WESTHUS, W. (2004): Die Naturräume Thüringens – Artenschutz, Biotopschutz und Reservatsystem. Naturschutzreport, 21. Jena.
- HÖLLERL, S. (2009): Auswirkungen von waldbaulichen Maßnahmen auf die Stabilität (Resistenz und Elastizität) von Fichtenreinbeständen in der Bergmischwaldstufe der Bayerischen Alpen – Eine Analyse aus waldbaulich-forstökonomischer Sicht. Dissertation. TU München, Lehrstuhl für Waldbau.
- HÖLLERL, S.; MOSANDL, R. (2009): Stabilisierung montaner Fichtenbestände – Nur rechtzeitig durchforsten und verjüngen führt zum Erfolg. In: *LWF aktuell* 68, S. 11–13.
- HOLUBA, K.-H.; SCHWIEGER, V.; RAMM, K. (2004): Low-Cost GPS-Empfänger im praktischen Reviereinsatz. In: *AFZ-Der Wald* 59 (23), S. 1243–1246.
- HONDA, H.; FISHER, J. B. (1978): Tree branch angle – Maximizing effective leaf area. In: *Science* 199, S. 888–890.
- HOUSKOVA, K.; MAUER, O. (2013): Effect of the density of transplants in reforestation on the morphological quality of the above-ground part of European beech (*Fagus sylvatica* L.) six years after planting. In: *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis* 61 (188), S. 1703–1713.
- HUBER, G.; WEZEL, G.; FAUST, K.; METZGER, H.-G. (2011): Frostschäden im Mai 2011. In: *AFZ-Der Wald* 66 (16), S. 10–12.
- HURLBERT, S. H. (1984): Pseudoreplication and the design of ecological field experiments. In: *Ecological Monographs* 54 (2), S. 187–211.



- HUTH, F.; WAGNER, S. (2013): Ökosystemleistungen von Dauerwäldern – Eine aktuelle Analyse des Waldbaus. In: *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* 164 (2), S. 27–36.
- IDRE (2015): R data analysis examples – multinomial logistic regression. Institute for Digital Research and Education. Online verfügbar unter: <http://www.ats.ucla.edu/stat/r/dae/mlogit.htm>, zuletzt geprüft am 12.02.2015.
- IPCC (2013): Climate change 2013 – the physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Hg. v. T. F. STOCKER, D. QIN, G.-K. PLATTNER, M. M. B. TIGNOR, M. B. ALLEN, J. BOSCHUNG ET AL. Cambridge/New York: Cambridge University Press.
- IRRGANG, S. (1996): Konzeption und erste Ergebnisse von Waldumbauversuchen in Fichten- und Kiefernreinbeständen. In: LAF (Hg.): Waldumbau – Beiträge zum Kolloquium. Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Forsten, 6. Graupa, S. 96–117.
- IRRGANG, S. (2002): Klimaänderung und Waldentwicklung in Sachsen – Auswirkungen auf die Forstwirtschaft. In: *Forstarchiv* 73, S. 137–148.
- IRRGANG, S. (2008): Aufforstung „Kyrill“-geschädigter Wälder am Beispiel des Forstbezirkes Bärenfels. Hg. v. Sachsenforst. Bärenfels. Online verfügbar unter: [http://www.smul.sachsen.de/sbs/download/05\\_Irrgang\\_Aufforstung\\_Baerenfels.pdf](http://www.smul.sachsen.de/sbs/download/05_Irrgang_Aufforstung_Baerenfels.pdf), zuletzt aktualisiert am 04.04.2008, zuletzt geprüft am 30.10.2012.
- JANSSEN, J.; LAATZ, W. (2007): Statistische Datenanalyse mit SPSS für Windows. 6., neu bearbeitete und erweiterte Auflage. Berlin/Heidelberg: Springer.
- JARCUSKA, B. (2009): Growth, survival, density, biomass partitioning and morphological adaptations of natural regeneration in *Fagus sylvatica* – A review. In: *Dendrobiology* 61, S. 3–11.
- KÄTZEL, R.; LÖFFLER, S.; WINTER, S.; KALLWEIT, R. (2004): Untersuchungen zur Lichtanpassung von Buchen-Voranbauten bei unterschiedlicher Überschirmung. In: *Beiträge für Forstwirtschaft und Landschaftsökologie* 38 (2), S. 74–80.
- KERR, G.; BOSWELL, R. C. (2001): The influence of spring frosts, ash bud moth (*Prays fraxinella*) and site factors on forking of young ash (*Fraxinus excelsior*) in southern Britain. In: *Forestry* 74 (1), S. 29–40.
- KIENITZ, E. (1936): Wandlung des Holzartenbildes im sächsischen Staatswalde seit dem 16. Jahrhundert, mit Ausblicken auf die Pollenanalyse (zunächst dargestellt an den Forstinspektionsbezirken Eibenstock und Grimma). Tharandter Forstliches Jahrbuch, 87. Tharandt.
- KINT, V.; HEIN, S.; CAMPIOLI, M.; MUYS, B. (2010): Modelling self-pruning and branch attributes for young *Quercus robur* L. and *Fagus sylvatica* L. trees. In: *Forest Ecology and Management* 260, S. 2023–2034.
- KLÄDTKE, J. (2002): Wachstum großkroniger Buchen und waldbauliche Konsequenzen. In: *Forstarchiv* 73 (6), S. 211–217.
- KLEIN, E. (1983): Rationelle Pflanzverbände bei der künstlichen Begründung von Buchen-Vorausverjüngungen. In: *AFZ-Der Wald* 38, S. 231–233.
- KLEIN, E. (1990): Die Durchforstungszelle reaktivieren – Abkehr von der Z-Baumauswahl! In: *AFZ-Der Wald* 45 (32), S. 830–831.
- KNOERZER, D. (2004): Was ist eine Sturmwurffläche? Versuch einer Antwort auf eine nur scheinbar triviale Frage. In: *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 175 (6), S. 109–117.

- KNOKE, T.; AMMER, C.; STIMM, B.; MOSANDL, R. (2008): Admixing broadleaved to coniferous tree species – A review on yield, ecological stability and economics. In: *European Journal of Forest Research* 127, S. 89–101.
- KNOKE, T.; HAHN, A. (2007): Baumartenvielfalt und Produktionsrisiken – Ein Forschungseinblick und -ausblick. In: *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* 158 (10), S. 312–322.
- KNOKE, T.; SEIFERT, T. (2008): Integrating selected ecological effects of mixed European beech-Norway spruce stands in bioeconomic modelling. In: *Ecological Modelling* 210, S. 487–498.
- KOCH, H. (1992): Pflanzenzahlen und Pflanzverbände am Beispiel von Kiefer, Eiche und Buche. In: *AFZ-Der Wald* 47 (5), S. 245–247.
- KODRÍK, J. (1988): Einfluss der bestandesbildenden Kennziffern auf die Intensität der Beschädigung von Buchenbeständen durch Schnee. In: S. Korpel und L. Paule (Hg.): 3. IUFRO Buchensymposium. Zvolen, S. 327–330.
- KÖHLER, W.; SCHACHTEL, G.; VOLESKE, P. (2002): Biostatistik. 3. Auflage. Berlin/Heidelberg: Springer.
- KOHLSTEDT, E.; AUER, I.; ARENHÖVEL, W.; FRISCHBIER, N.; BRÜMMEL, R. (2014): Die landeseigene Thüringer Forstbaumschule Breitenworbis – Forstliches Vermehrungsgut in Thüringen. In: *AFZ-Der Wald* 69 (19), S. 19–22.
- KOHNLE, U.; KLÄDTKE, J.; MICHIELS, H.-G. (2014): Waldentwicklungstypen – Standorts- und wachstumskundliche Aspekte. Überarbeitung der WET-Richtlinie in Baden-Württemberg. In: *AFZ-Der Wald* 69 (10), S. 9–11.
- KÖLLING, C.; KNOKE, T.; SCHALL, P.; AMMER, C. (2009): Überlegungen zum Risiko des Fichtenanbaus in Deutschland vor dem Hintergrund des Klimawandels. In: *Forstarchiv* 80 (2), S. 42–54.
- KÖLLING, C.; WALENTOWSKI, H.; BORCHERT, H. (2005): Die Buche in Mitteleuropa – Eine Waldbaumart mit grandioser Vergangenheit und sicherer Zukunft. In: *AFZ-Der Wald* 60 (13), S. 696–701.
- KÖNIG, A. (1995): Sturmgefährdung von Beständen im Altersklassenwald – Ein Erklärungs- und Prognosemodell. Frankfurt a. M.: J. D. Sauerländer's.
- KRAHL-URBAN, J. (1953): Baumtypen bei Eichen und Buchen. In: *Allgemeine Forstzeitschrift* 8 (20), S. 245–248.
- KRAHL-URBAN, J. (1962): Buchen-Nachkommenschaften. In: *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 133 (2), S. 29–38.
- KRAHL-URBAN, J. (1963): Untersuchungen über Verbandsweiten bei Buchenpflanzungen. In: *Forstarchiv* 34 (6), S. 157–164.
- KRAMER, H. (1988): Waldwachstumslehre – Ökologische und anthropogene Einflüsse auf das Wachstum des Waldes, seine Massen- und Wertleistung und die Bestandessicherheit. Hamburg/Berlin: Paul Parey.
- KRAMER, H.; AKCA, A. (2002): Leitfaden zur Waldmesslehre. 4. Auflage. Frankfurt a. M.: J. D. Sauerländer's.
- KUNSTLER, G.; CURT, T.; BOUCHAUD, M.; LEPART, J. (2005): Growth, mortality, and morphological response of European beech and downy oak along a light gradient in sub-Mediterranean forest. In: *European Journal of Forest Research* 35, S. 1657–1668.

- KÜPPERS, M. (1987): Hecken – Ein Modellfall für die Partnerschaft von Physiologie und Morphologie bei der pflanzlichen Produktion in Konkurrenzsituationen. In: *Naturwissenschaften* 74 (11), S. 536–547.
- KÜPPERS, M. (1989): Ecological significance of aboveground architectural patterns in woody plants – A question of cost-benefit relationships. In: *Tree* 4 (12), S. 375–379.
- KURTH, A. (1946): Untersuchungen über Aufbau und Qualität von Buchendickungen. In: H. Burger (Hg.): *Mitteilungen der Schweizerischen Anstalt für das forstliche Versuchswesen*, XXIV, Heft 2. Zürich: Kommissionsverlag von Beer & Cie, S. 581–657.
- KÜSTER, B. (2000): Die Auswirkungen unterschiedlicher waldbaulicher Behandlungen auf das Wachstum und die Qualitätsentwicklung junger Traubeneichen [*Quercus Petraea* (Matt.) Liebl.]. *Forstliche Forschungsberichte München*, 179. München: Frank.
- LAF (Hg.) (1996): *Waldumbau – Beiträge zum Kolloquium*. Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Forsten, 6. Graupa.
- LAF (Hg.) (1997): *Natürliche Waldvegetationslandschaften 1:300.000*. Sächsische Landesanstalt für Forsten. Graupa.
- LAF (2002): *Bestandespflege – Richtlinie zur Bestandespflege und Wertästung im Staatswald des Freistaates Sachsen*. Hg. v. der Sächsischen Landesanstalt für Forsten. Graupa.
- LANDESAMT FÜR VERMESSUNG UND GEOINFORMATION (2015): *Geoportal-Th.de. Digitale Orthophotos RGB (Bodenauflösung 2 m) für den Freistaat Thüringen*. Geodatendienste über WMS. Online verfügbar unter: <http://www.geoproxy.geoportal-th.de/geoproxy/services/DOP>, zuletzt geprüft am 26.01.2015.
- LANDESVERMESSUNGSAMT SACHSEN (2014): *Digitale Orthophotos RGB (Bodenauflösung 20 cm) für den Freistaat Sachsen*. Geodatendienste über WMS. Online verfügbar unter: [https://geodienste.sachsen.de/wms\\_geosn\\_dop-rgb/guest?](https://geodienste.sachsen.de/wms_geosn_dop-rgb/guest?), zuletzt geprüft am 26.01.2015.
- LANGHAUSEN, J. (2009): *Optionen der Wachstumssteuerung zur Produktion von Wertholz bei der Baumart Buche (Fagus sylvatica L.)*. Dissertation. Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg i. Br.
- LANNER, R. M. (1985): On the insensitivity of height growth to spacing. In: *Forest Ecology and Management* 13, S. 143–148.
- LAWUF (1997): *Die forstlichen Wuchsgebiete und Wuchsbezirke Thüringens*. Mitteilungen der Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, 13/1997. Gotha.
- LE TACON, F. (1985): Die Pflanzung auf der Freifläche – Einer der Gründe für die schlechte Form der Buche im Nordosten von Frankreich. In: *Der Forst- und Holzwirt* 12, S. 339–342.
- LEDER, B. (1992): *Weichlaubhölzer – Verjüngungsökologie, Jugendwachstum und Bedeutung in Jungbeständen der Hauptbaumarten Buche und Eiche*. Arnberg: Zimmermann.
- LEDER, B.; HILLEBRAND, K. (2001): Überlegungen zur Charakterisierung der Qualitätsentwicklung in Buchen-Jungwüchsen. In: *Forst und Holz* 56 (2), S. 44–49.
- LEDER, B.; WEIHS, U. (2000): Wachstum und qualitative Entwicklung eines 8 Jahre alten Buchen-Verbandsversuches unter Kiefer im Niederrheinischen Tiefland. In: *Forst und Holz* 55 (6), S. 172–176.
- LEHMANN, R. (2007): *Die Auswirkungen von Orkan Kyrill auf den sächsischen Wald*. Hg. v. Sachsenforst. Graupa. Online verfügbar unter: [http://www.smul.sachsen.de/sbs/download/02\\_OrkanKyrill\\_Lehmann.pdf](http://www.smul.sachsen.de/sbs/download/02_OrkanKyrill_Lehmann.pdf), zuletzt aktualisiert am 11.04.2007, zuletzt geprüft am 30.10.2012.

- LEIBUNDGUT, H. (1969): Erhöht eine starke Durchforstung die Windwurfgefahr? In: *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* 120, S. 110–112.
- LEIBUNDGUT, H. (1978): Die Waldpflege. Unter Mitverwendung von „Auslesedurchforstung als Erziehungsbetrieb höchster Wertleistung“ von Walter Schädelin. 2., durchgearbeitete und erweiterte Auflage. Bern: Paul Haupt.
- LEIBUNDGUT, H. (1982): Die Aufforstung. Bern/Stuttgart: Paul Haupt.
- LEIBUNDGUT, H. (1984): Unsere Waldbäume – Eigenschaften und Leben. Frauenfeld: Huber.
- LEITGEB, E.; GÄRTNER, U.; KAZDA, M.; OLESKOG, G.; LÖF, M. (2005): Ökologische und waldbauliche Grundlagen für Buchenvoranbau unter Fichtenschirm. Hg. v. der Bundesforschungs- und Ausbildungsanstalt für Wald Naturgefahren und Landschaft (BFW). Wien. Online verfügbar unter: [http://bfw.ac.at/030/pdf/2393\\_1.pdf](http://bfw.ac.at/030/pdf/2393_1.pdf), zuletzt aktualisiert am 09.06.2005, zuletzt geprüft am 15.06.2012.
- LEONHARDT, B. (2005): Wuchsverhalten von Buchenvoranbauten bei variierender Schirm- und Seitendruckkonkurrenz. Unveröffentlichter Abschlussbericht zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben Nummer 41-53710/VE 1. TU Dresden, Institut für Waldbau und Forstschutz, Professur für Waldbau. Tharandt.
- LEONHARDT, B. (2006): Wachstum und Qualitätsentwicklung von Einzelbäumen in Buchenvoranbauten. Unveröffentlichter Abschlussbericht zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben Nummer 41-53710/50037. TU Dresden, Institut für Waldbau und Forstschutz, Professur für Waldbau. Tharandt.
- LEONHARDT, B.; WAGNER, S. (2006): Qualitative Entwicklung von Buchen-Voranbauten unter Fichtenschirm. In: *Forst und Holz* 61 (11), S. 454–457.
- LICHTENTHALER, H.; BUSCHMANN, C.; DÖLL, M.; FIETZ, H.-J.; BACH, T.; KOZEL, U. ET AL. (1981): Photosynthetic activity, chloroplast ultrastructure, and leaf characteristics of high-light and low-light plants and of sun and shade leaves. In: *Photosynthesis Research* 2, S. 115–141.
- LINNERT, M. (2009): Wachstum und Qualität junger Buchen in einem unterschiedlich aufgelichteten Fichtenaltbestand. Dissertation. Universität Göttingen.
- LOETSCH, F.; ZÖHRER, F.; HALLER, K. E. (1973): Forest Inventory. Band 2. München/Bern/Wien: BLV.
- LÖF, M.; KARLSSON, M.; SONESSON, K.; WELANDER, N. T.; COLLET, C. (2007): Growth and mortality in underplanted tree seedlings in response to variations in canopy closure of Norway spruce stands. In: *Forestry* 80 (4), S. 371–384.
- LÖF, M.; WELANDER, N. T. (2000): Carry-over effects on the growth and transpiration in *Fagus sylvatica* seedlings after drought at various stages of development. In: *Canadian Journal of Forest Research* 30, S. 468–475.
- LONGUETAUD, F.; PIBOULE, A.; WERNSDÖRFER, H.; COLLET, C. (2013): Crown plasticity reduces inter-tree competition in a mixed broadleaved forest. In: *European Journal of Forest Research* (online veröffentlicht).
- LÜPKE, B. VON (1986): Die Durchforstung, insbesondere Jungdurchforstung von Buchenreinbeständen. In: *Forst und Holz* 41, S. 54–61.
- LÜPKE, B. VON (1987): Einflüsse von Altholzüberschirmung und Bodenvegetation auf das Wachstum junger Buchen und Traubeneichen. In: *Forstarchiv* 58, S. 18–24.
- LÜTTGE, U.; KLUGE, M.; BAUER, G. (2005): Botanik. 5. Auflage. Weinheim: Wiley-VCH.



- MAJUNKE, C.; MATZ, S.; MÜLLER M. (2008): Sturmschäden in Deutschlands Wäldern von 1920 bis 2007 – Mehr als eine Statistik. In: *AFZ-Der Wald* 63 (7), S. 380–381.
- MÄKINEN, H. (1996): Effect of intertree competition on branch characteristics of *Pinus sylvestris* families. In: *Scandinavian Journal of Forest Research* 11, S. 129–136.
- MÄKINEN, H. (1999): Effect of stand density on radial growth of branches of Scots pine in southern and central Finland. In: *Canadian Journal of Forest Research* 29 (8), S. 1216–1224.
- MÄKINEN, H. (2002): Effect of stand density on the branch development of silver birch (*Betula pendula* Roth) in central Finland. In: *Trees* 16, S. 346–353.
- MÄKINEN, H.; COLIN, F. (1999): Predicting the number, death, and self-pruning of branches in Scots pine. In: *Canadian Journal of Forest Research* 29, S. 1225–1236.
- MÄKINEN, H.; HEIN, S. (2006): Effect of wide spacing on increment and branch properties of young Norway spruce. In: *European Journal of Forest Research* 125, S. 239–248.
- MANTAU, U. (2015): Die überragende Bedeutung des Nadelholzes – Der Laubholz-Irrweg. In: *AFZ-Der Wald* 70 (17), S. 24–26.
- MARTENS, S. (2008): Aufforstungskonzeption für den Landeswald nach Kyrill. Hg. v. Sachsenforst. Graupa. Online verfügbar unter: [http://www.smul.sachsen.de/sbs/download/04\\_Martens\\_Aufforstung.pdf](http://www.smul.sachsen.de/sbs/download/04_Martens_Aufforstung.pdf), zuletzt aktualisiert am 04.04.2008, zuletzt geprüft am 30.10.2012.
- MARTENS, S.; PREIBLER, C. (2010): Reaktion von Verjüngungen unter Fichtenschirm auf plötzliche Freistellung. In: *AFZ-Der Wald* 65 (10), S. 14–18.
- MARTENS, S. N.; BRESHEARS, D. D.; MEYER, C. W. (2000): Spatial distributions of understory light along the grassland/forest continuum – Effects of cover, height, and spatial pattern of tree canopies. In: *Ecological Modelling* 126, S. 79–93.
- MARVIE-MOHADJER, M. R. (1975): Über Qualitätsmerkmale der Buche – Untersuchungen über die Abhängigkeit verschiedener morphologischer Merkmale der Buche (*Fagus sylvatica* L.) vom Standort. ETH Zürich, Dissertation Nr. 5306. Beiheft zur Schweizerischen Zeitschrift für Forstwesen, 54. Zürich: aku-Fotodruck.
- MATJAZ, C.; PRIMOZ, S. (2010): Root distribution of under-planted European beech (*Fagus sylvatica* L.) below the canopy of mature Norway spruce stand as a function of light. In: *European Journal of Forest Research* 129, S. 531–539.
- MATTHES, U. (1997): Waldökologische Analyse und Bewertung von Waldumbaumaßnahmen im bayerischen Staatswald als Beitrag für eine naturnahe Forstwirtschaft. München: Herbert Utz.
- MATYSSEK, R.; FROMM, J.; RENNENBERG, H.; ROLOFF, A. (2010): Biologie der Bäume – Von der Zelle zur globalen Ebene. Stuttgart: Eugen Ulmer.
- MAYER, H. (1992): Waldbau auf soziologisch-ökologischer Grundlage. 4., neu bearbeitete Auflage. Stuttgart: Gustav Fischer.
- MCPFE (1993): Second Ministerial Conference on the Protection of Forests in Europe. RESOLUTION H1 – General guidelines for the sustainable management of forests in Europe. Helsinki. Online verfügbar unter: [http://www.foresteurope.org/sfm\\_criteria/guidelines](http://www.foresteurope.org/sfm_criteria/guidelines), zuletzt geprüft am 10.10.2015.
- MESSIER, C.; NIKINMAA, E. (2000): Effects of light availability and sapling size on the growth, biomass allocation, and crown morphology of understory sugar maple, yellow birch, and beech. In: *Ecoscience* 7 (3), S. 345–356.

- MEYER, P.; ACKERMANN, J. (2004): Lückendynamik in Buchen-Naturwäldern Nordwestdeutschlands. In: *LWF Wissen* 46, S. 10–14.
- MITSCHERLICH, G. (1940): Das Forstamt Dietzhausen. In: *Zeitschrift für Forst- und Jagdwesen* 72, S. 213–223.
- MITSCHERLICH, G. (1970): Wald, Wachstum und Umwelt – Eine Einführung in die ökologischen Grundlagen des Waldwachstums. Form und Wachstum von Baum und Bestand, Band 1. Frankfurt a. M.: J. D. Sauerländer's.
- MITSCHERLICH, G. (1974): Sturmgefahr und Sturmsicherung. In: *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* 125 (4), S. 199–216.
- MLINSEK, D.; BAKKER, A. (1990): Jugendwachstum und Holzqualität bei der Buche. In: *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 109, S. 242–248.
- MÖHRING, B. (2004): Betriebswirtschaftliche Analyse des Waldumbaus – Keine Chance für die Buche? In: *AFZ-Der Wald* 59 (18), S. 963.
- MÖHRING, B.; WILHELM, S. (2015): Nadelholz – Ökonomische Basis für Forstbetriebe. In: *AFZ-Der Wald* 70 (17), S. 20–23.
- MOURELLE, C.; KELLMAN, M.; KWON, L. (2001): Light accluation at forest edges – An analysis of tree architectural characteristics. In: *Forest Ecology and Management* 154, S. 179–192.
- MOUTINHO, L.; HUTCHESON, G. D. (2011): The SAGE Dictionary of Quantitative Management Research. London: Sage.
- MUCK, P.; BORCHERT, T.; HAHN, J.; IMMLER, T.; JOOS, A.; KONNERT, M.; WALENTOWSKI, H.; WALTER, A. (2009): Die Rotbuche – Mutter des Waldes. In Zeiten des Klimawandels kommt unserer heimischen Buche im Waldumbau eine tragende Rolle zu. In: *LWF aktuell* (69), S. 54–57.
- MUHLE, O.; KAPPICH, I. (1979): Erste Ergebnisse eines Buchen-Provenienz- und Verbandsversuchs im Forstamt Bramwald. In: *Forstarchiv* 50 (4), S. 65–69.
- NAGEL, R.-V.; SPELLMANN, H. (2008): Wachstum, Behandlung und Ertrag von Reinbeständen der Rotbuche (*Fagus sylvatica* L.) in Nordwestdeutschland – Ergebnisse angewandter Forschung zur Rotbuche. In: *Beiträge aus der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt*, 3, S. 221–265.
- NAGEL, T. A.; DIACI, J. (2006): Intermediate wind disturbance in an old-growth beech-fir forest in southeastern Slovenia. In: *Canadian Journal of Forest Research* 36, S. 629–638.
- NAUMANN, S.; KÜHNEL, J.; NICKE, A. (2004): Genauigkeitsuntersuchung bei DGPS-Messungen im Wald. In: *AFZ-Der Wald* 59 (4), S. 175–177.
- NEUMANN, K.; KETTERER, R. (2015): Waldbauliche Strategien mit Nadelholz im Privatwald. In: *AFZ-Der Wald* 70 (17), S. 27–30.
- NEUMANN, M.; RÖSSLER, G. (2006): Qualität und Bewirtschaftung von Buche. In: *BFW-Praxisinformationen* (12), S. 15–17. Online verfügbar unter: [http://bfw.ac.at/100/pdf/1818\\_pi12\\_S15S17.pdf](http://bfw.ac.at/100/pdf/1818_pi12_S15S17.pdf), zuletzt geprüft am 14.03.2013.
- NICOLINI, E.; CARAGLIO, Y. (1994): L'influence de divers caractères chrchitecturaux sur l'apparition de la fource chez le *Fagus sylvatica*, en fonction de l'absence ou de présence d'un couvert. In: *Canadian Journal of Botany* 72, S. 1723–1734.



- NIELSEN, C. N.; JORGENSEN, F. V. (2003): Phenology and diameter increment in seedlings of European beech (*Fagus sylvatica* L.) as affected by different soil water contents – Variation between and within provenances. In: *European Journal of Forest Research* 174, S. 233–249.
- NIINEMETS, Ü.; VALLADERES, F. (2006): Tolerance to shade, drought, and waterlogging of temperate northern hemisphere trees and shrubs. In: *Ecological Monographs* 76 (4), S. 521–547.
- NINGRE, F.; COLIN, F. (2007): Frost damage on the terminal shoot as a risk factor of fork incidence on common beech (*Fagus sylvatica* L.). In: *Annals of Forest Science* 64, S. 79–86.
- OSWALD, L. (2012): Flächenpotentiale für aktiven Waldumbau in Thüringens Staatswald ermittelt. In: *Das Blatt – Mitarbeiterzeitschrift der Thüringer Landesforstanstalt* 19 (06/2012), S. 10–12.
- OTT, B. (2001): Die Bilanzierung von Buchenkulturen auf der Freifläche nach Windwurf. In: *AFZ-Der Wald* 56 (23), S. 1204–1207.
- OTT, B.; GOLDMANN, I.; BARTSCH, N. (2003): Qualität von Buchenkulturen auf Windwurfflächen. In: *AFZ-Der Wald* 58 (5), S. 265–267.
- OTT, B.; LÜPKE, B. VON. (2006): Erfolg von Buchenpflanzungen auf Sturmwurfflächen von 1990 im hessischen Vogelsberg. In: *Forstarchiv* 77, S. 119–126.
- OTTO, H.-J. (1985): Pflanzenzahlen bei der künstlichen Bestandesbegründung. In: *Der Forst- und Holzwirt* 40 (3), S. 51–64.
- OTTO, H.-J. (1994): Waldökologie. Stuttgart: Eugen Ulmer.
- OTTO, H.-J. (1995): Die Verwirklichung des LÖWE-Regierungsprogramms – Niedersächsische Landesforsten. In: *AFZ-Der Wald* 60 (19), S. 1028–1031.
- PALMER, S. (1985): Der Buchen-Vorbau – Seine Bedeutung, Planung und Technik. In: *Allgemeine Forstzeitschrift* 40 (45), S. 1217–1220.
- PEIK, K. (1976): Auswirkungen von Spätfrostschäden auf das Höhenwachstum junger Buchen verschiedener Herkunft. In: *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 147 (6–7), S. 142–147.
- PETERSEN, R.; WAGNER, S. (1999): Erste Ergebnisse eines Voranbauversuches unter Kiefer im östlichen Niedersachsen. In: *Forst und Holz* 54 (20), S. 647–653.
- PETRITAN, A. M.; LÜPKE, B. VON; PETRITAN, I. C. (2007): Effects of shade on growth and mortality of maple (*Acer pseudoplatanus*), ash (*Fraxinus excelsior*) and beech (*Fagus sylvatica*) saplings. In: *Forestry* 80 (4), S. 397–412.
- PETRITAN, A. M.; LÜPKE, B. VON; PETRITAN, I. C. (2009): Influence of light availability on growth, leaf morphology and plant architecture of beech (*Fagus sylvatica* L.), maple (*Acer pseudoplatanus* L.) and ash (*Fraxinus excelsior* L.) saplings. In: *European Journal of Forest Research* 128 (1), S. 61–74.
- PETRITAN, I. C.; LÜPKE, B. VON; PETRITAN, A. M. (2010): Einfluss unterschiedlicher Hiebsformen auf das Wachstum junger Buchen und Douglasien aus Pflanzung. In: *Forstarchiv* 81 (2), S. 40–52.
- PETRITAN, I. C.; LÜPKE, B. VON; PETRITAN, A. M. (2011): Effects of root trenching of overstorey Norway spruce (*Picea abies*) on growth and biomass of underplanted beech (*Fagus sylvatica*) and Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii*) saplings. In: *European Journal of Forest Research* 130, S. 813–828.

- PINHEIRO, J. C.; BATES, D. M. (2000): Mixed-Effects Models in S and S-PLUS – Statistics and Computing. New York: Springer.
- PLANCHAIS, I.; SINOQUET, H. (1998): Foliage determinants of light interception in sunny and shaded branches of *Fagus sylvatica* (L.). In: *Agricultural and Forest Meteorology* 89, S. 241–253.
- POULSON, T. L.; PLATT, W. J. (1989): Gap light regimes influence canopy tree diversity. In: *Ecology* 70 (3), S. 553–555.
- PRETZSCH, H. (2005): Effizienz der Raumbesetzung von Buche (*Fagus sylvatica* L.), Fichte [*Picea abies* (L.) Karst.], Kiefer (*Pinus sylvestris* L.) und Eiche [*Quercus petraea* (Mattuschka) Liebl.] im Rein- und Mischbestand. In: G. KENK (Hg.): Jahrestagung der Sektion Ertragskunde im DVFFA in Unterreichenbach-Kapfenhardt. Freiburg i. Br.: Selbstverlag, S. 91–111.
- PRETZSCH, H.; SCHÜTZE, G. (2005): Crown allometry and growing space efficiency of Norway spruce [*Picea abies* (L.) Karst.] and European beech (*Fagus sylvatica* L.) in pure and mixed stands. In: *Plant Biology* 7, S. 628–639.
- PRETZSCH, H.; SCHÜTZE, G. (2009): Transgressive overyielding in mixed compared with pure stands of Norway spruce and European beech in Central Europe – Evidence on stand level and explanation on individual tree level. In: *European Journal of Forest Research* 128, S. 183–204.
- PRETZSCH, H.; SCHÜTZE, G.; UHL, E. (2013): Resistance of European tree species to drought stress in mixed versus pure forests – Evidence of stress release by inter-specific facilitation. In: *Plant Biology* 15, S. 483–495.
- PRÉVOSTO, B.; CURT, T. (2004): Dimensional relationships of naturally established European beech trees beneath Scots pine and Silver birch canopy. In: *Forest Ecology and Management* 194, S. 335–348.
- PROFFT, I.; SEILER, M.; ARENHÖVEL, W. (2007): Die Zukunft der Fichte in Thüringen vor dem Hintergrund des Klimawandels. In: *Forst und Holz* 62 (2), S. 19–25.
- PUKKALA, T.; KUULUVAINEN, T.; STENBERG, P. (1993): Below-canopy distribution of photosynthetically active radiation and its relation to seedling growth in a boreal *Pinus sylvestris* stand – A simulation approach. In: *Scandinavian Journal of Forest Research* 8, S. 313–325.
- RAST, E. D.; BRISBIN, R. L. (1987): Six-year effects of two late spring frosts on Appalachian hardwoods. In: *Northern Journal of Applied Forestry* 4, S. 26–28.
- REDMANN, M.; REGENSTEIN, M. (2010): Datenspeicher Wald, Version 2 – Nutzen für die Betriebssteuerung aus Sicht der Revierleitung. In: *AFZ-Der Wald* 65 (13), S. 10–11.
- REINHOLD, F. (1942): Die Bestockung der kursächsischen Wälder im 16. Jahrhundert – Eine kritische Quellenzusammenfassung. Dresden.
- REKIS (2015a): Forstliche Vegetationszeitdauer für Sachsen – Vorgerechnete Rasterdaten für die Klimanormalperiode 1981–2010 (gemessene Zeitreihen). Online verfügbar unter: <http://141.30.160.224/fdm/index.jsp?k=rekis> (nur mit Registrierung). zuletzt geprüft am 05.05.2015.
- REKIS (2015b): Regionales Klimainformationssystem für Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen – Klimarasterdaten aus dem Interpolationstool RaKliDa für die Normalperiode 1981–2010. Für das Untersuchungsgebiet angeforderter Datensatz der Jahreswerte zu Temperatur, Niederschlag und klimatischer Wasserbilanz.

- RIBBENS, E.; SILANDER, J. A.; PACALA, S. W. (1994): Seedling recruitment in forests: calibrating models to predict patterns of tree seedling dispersion. In: *Ecological Society of America* 75 (6), S. 1794–1806.
- RICHTER, J. (1990): Kronentypen bei der Rotbuche. In: *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 161 (1), S. 11–15.
- RICHTER, J. (1999): Inwieweit sind Kronenform und Schaftqualität der Rotbuche genetisch bedingt? In: *Forst und Holz* 54 (15), S. 460–462.
- RICHTER, J. (2015): Erfahrungen mit Sturmschäden. In: *AFZ-Der Wald* 70 (16), S. 18–19.
- RIEDL, R. (2008): Lineare gemischte Modelle für longitudinale Daten. Diplomarbeit in technischer Mathematik. TU Graz, Graz.
- ROBAKOWSKI, P.; ANTCZAK, P. (2008): Ability of silver fir and european beech saplings to acclimate photochemical processes to the light environment under different canopies of trees. In: *Polish Journal of Ecology* 56 (1), S. 3–16.
- ROCK, J.; PUETTMANN, K.-J.; GOCKEL, H. A.; SCHULTE, A. (2004): Spatial aspects of the influence of silver birch (*Betula pendula* L.) on growth and quality of young oaks (*Quercus* spp.) in central Germany. In: *Forestry* 77 (3), S. 235–247.
- ROESSIGER, J.; GRIESS, V. C.; HÄRTL, F.; CLASEN, C.; KNOKE, T. (2013): How economic performance of a stand increases due to decreased failure risk associated with the admixing of species. In: *Ecological Modelling* 255, S. 25–69.
- RÖHRIG, E.; BARTSCH, N.; LÜPKE, B. VON (2006): Waldbau auf ökologischer Grundlage. 7. Auflage. Stuttgart: Eugen Ulmer.
- ROLOFF, A. (1986): Morphologie der Kronenentwicklung von *Fagus sylvatica* L. (Rotbuche) unter besonderer Berücksichtigung möglicherweise neuartiger Veränderungen. Berichte des Forschungszentrums Waldökologie/Waldsterben. Universität Göttingen, Institut für Forstbotanik.
- ROLOFF, A. (2001): Baumkronen – Verständnis und praktische Bedeutung eines komplexen Naturphänomens. Stuttgart: Eugen Ulmer.
- ROTHER, M.; KREUTZER, K. (1998): Wechselwirkungen zwischen Fichte und Buche im Mischbestand. In: *AFZ-Der Wald* 53 (15), S. 784–787.
- ROTTMANN, M. (1986): Wind- und Sturmschäden im Wald – Beiträge zur Beurteilung der Bruchgefährdung, zur Schadensvorbeugung und zur Behandlung sturmgefährdeter Nadelholzbestände. Frankfurt a. M.: J. D. Sauerländer's.
- ROZAS, V.; FERNÁNDEZ PRIETO, J. A. (2000): Competition, mortality, and development of spatial patterns in two Cantabrian populations of *Fagus sylvatica* L. (Fagaceae). In: *Anales del Jardín Botánico de Madrid* 58 (1), S. 117–131.
- ROZENBERGAR, D.; DIACI, J. (2014): Architecture of *Fagus sylvatica* regeneration improves over time in mixed old-growth and managed forests. In: *Forest Ecology and Management* 318, S. 334–340.
- RUDOLPH, K.; FIRBAS, F. (1924): Die Hochmoore des Erzgebirges. BBC – Beiheft zum Botanischen Centralblatt.
- RUMPF, H.; PETERSEN, R. (2008): Waldumbau mit der Buche unter Berücksichtigung ihrer ökologischen Ansprüche. In: NW-FVA (Hg.): Ergebnisse angewandter Forschung zur Buche. Beiträge aus der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt, 3. Göttingen, S. 193–219.

- SACHSENFORST (2011a): Arbeitsanweisung zur bestandesweisen Zustandserfassung und Planung (AA WAB). Graupa.
- SACHSENFORST (2011b): Waldzustandsbericht 2010 – Die Zukunft im Blick. Dresden: Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft.
- SACHSENFORST (2012): Teilflächenblätter zur Forsteinrichtung im Landeswald Sachsens – Auszug für die Forstbezirke Bärenfels, Chemnitz und Eibenstock. Unveröffentlichter Datensatz. Pirna.
- SACHSENFORST (2013a): Geschäftsbericht 2012 – Staatsbetrieb Sachsenforst. Graupa.
- SACHSENFORST (2013b): Richtlinie zu den Waldentwicklungstypen im Staatswald des Freistaates Sachsen, Teil 1. Graupa.
- SACHSENFORST (2013c): Waldzustandsbericht 2013. Dresden.
- SACHSENFORST (2014): Auszug der Vollzugsdaten für die Forstbezirke Bärenfels, Chemnitz und Eibenstock. Abfrage im Waldinformationssystem Sachsen (WIS). Unveröffentlichter Datensatz. Pirna.
- SAGHEB-TALEBI, K. (1996): Quantitative und qualitative Merkmale von Buchenjungwüchsen (*Fagus sylvatica* L.) unter Einfluss des Lichtes und anderer Standortsfaktoren. In: *Beiheft zur Schweizerischen Zeitschrift für Forstwesen* (78).
- SAGHEB-TALEBI, K.; SCHÜTZ, J.-P. (2002): The structure of natural oriental beech (*Fagus orientalis*) forests in the Caspian region of Iran and potential for the application of the group selection system. In: *Forestry* 75 (4), S. 465–472.
- SCHABER, R. (1933): Waldbauliches aus Thüringen, Heft 16. Weimar: Thüringische Hauptlandwirtschaftskammer.
- SCHALL, P.; LÖDIGE, C.; BECK, M.; AMMER, C. (2012): Biomass allocation to roots and shoots is more sensitive to shade and drought in European beech than in Norway spruce seedlings. In: *Forest Ecology and Management* 266, S. 246–253.
- SCHENK, S. (1994): Erfahrungen zum Voranbau für die Umwandlung. In: *AFZ-Der Wald* 49 (10), S. 519–520.
- SCHINDLER, D.; GREBHAN, K.; ALBRECHT, A.; SCHÖNBORN, J. (2009): Modelling the wind damage probability in forests in Southwestern Germany for the 1999 winter storm „Lothar“. In: *International Journal of Biometeorology* 53, S. 543–554.
- SCHLUTOW, A.; GEMBALLA, R. (2008): Sachsens Leitwaldgesellschaften – Anpassung in Bezug auf den prognostizierten Klimawandel. In: *AFZ-Der Wald* 63 (1), S. 28–31.
- SCHMALTZ, J.; FRÖHLICH, A.; GEBHARDT, M. (1997): Die Qualitätsentwicklung in jungen Traubeneichenbeständen im hessischen Spessart – Ergebnisse einer Aufnahme in einem Pflanzverbandsversuch. In: *Forstarchiv* 68, S. 3–10.
- SCHMIDTKE, H.; SCHERRER, H. (1997): Sturmschäden im Wald – Projektschlussbericht im Rahmen des nationale Forschungsprogrammes „Klimaänderungen und Naturkatastrophen in der Schweiz“, NFP 31. Zürich: vdf Hochschulverlag AG.
- SCHMIDT, M.; HANEWINKEL, M.; KÄNDLER, K. E.; KOHNLE, U. (2010): An inventory-based approach for modelling single-tree storm damage – Experiences with the winter storm of 1999 in southwestern Germany. In: *Canadian Journal of Forest Research* 40, S. 1636–1652.
- SCHMIDT, P. A.; HEMPEL, W.; DENNER, M.; DÖRING, N.; GNÜCHTEL, A.; WALTER, B.; WENDEL, D. (2002): Potentielle natürliche Vegetation Sachsens mit Karte 1:200000.



Materialien zu Naturschutz und Landschaftspflege. Hg. v. Sächsischen Landesamt für Umwelt und Geologie. Dresden.

SCHMITT, H. P.; MERTENS B.; LÜPKE, B. VON (1995): Buchenvoranbau im Stadtwald Meschede. In: *AFZ-Der Wald* 50 (20), S. 1071–1075.

SCHÖBER, R. (1988): Von Zukunfts- und Elitebäumen. In: *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 159 (11/12), S. 239–248.

SCHÖBER, R. (1990): Die Bedeutung des Umsetzens von Waldbäumen für Z-Baum-Durchforstungen. In: *AFZ-Der Wald* 45 (32), S. 824–828.

SCHRÖTER, M.; HÄRDTLE, W.; OHEIMB, G. VON (2011): Crown plasticity and neighborhood interactions of European beech (*Fagus sylvatica* L.) in an old-growth forest. In: *European Journal of Forest Research* (online veröffentlicht), zuletzt geprüft am 17.02.2012.

SCHULZ, F.; HEIN, S.; KENK, G.; KLÄDTKE, J. (2005): Qualitätsentwicklung in laubbaumdominierten Beständen aus Sukzession. In: *Forst und Holz* 60 (10), S. 407–410.

SCHUSSER, S. (2009): Der Forstbezirk Eibenstock nach den Sturmkatastrophen – Herausforderungen an einen naturnahen Waldbau im Interesse der Nachhaltigkeit. Hg. v. Sachsenforst. Eibenstock, 2009.

SCHUSTER, K. (2009): Laubholz – Qualität ist alles. In: *Wald und Holz* (10), S. 33–36.

SCHÜTZ, J.-P. (2000): Kosteneffiziente Waldpflege. Teil 2: Praktisches Vorgehen. In: *Wald und Holz* (12), S. 23–25.

SCHÜTZ, J.-P.; GÖTZ, M.; SCHMID, W.; MANDALLAZ, D. (2006): Vulnerability of spruce (*Picea abies*) and beech (*Fagus sylvatica*) forest stands to storms and consequences for silviculture. In: *European Journal of Forest Research* 125, S. 291–302.

SCHÜTZ, J.-P. (2001): Der Plenterwald – Und weitere Formen strukturierter und gemischter Wälder. Berlin: Paul Parey.

SCHWANECKE, W. (1990): Standortverhältnisse im Thüringer Gebirge. In: *AFZ-Der Wald* 55 (33–34), S. 838–841.

SCHWANECKE, W.; KOPP, D. (1996): Forstliche Wuchsgebiete und Wuchsbezirke im Freistaat Sachsen. Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Forsten, 8/1996. Graupa.

SEILER, M.; ARENHÖVEL, W.; PROFFT, I. (2007): Waldbauliche Konsequenzen für Thüringen. Klimaschutz und Klimawandel – Rolle der Forstwirtschaft. In: *Mitteilungen aus der Thüringer Landesanstalt für Wald, Jagd und Fischerei* (29), S. 28–41.

SHAHNAVAZI, H.; SAGHEB-TALEBI, K.; ZAHEDI AMIRI, G. H. A. D. (2005): Qualitative und quantitative evaluation of natural regeneration in gaps within beech (*Fagus orientalis* LIPSKY) stands of Caspian region (Persisch mit englischem Abstract). In: *Iranian Journal of Forest and Polar Research* 13 (2), S. 141–153.

SMUL (2013): Waldstrategie 2050 für den Freistaat Sachsen. Dresden.

SONDERMANN, D. (1979): Guide to the measurement of tree characteristics important to the quality classification system for young hardwood trees. In: *USDA Forest Service General Technical Report NE (USA)* 54.

SONE, K.; NOGUCHI, K.; TERASHIMA, I. (2006): Mechanical and ecophysiological significance of the form of a young *Acer rufrum* tree – Vertical gradient in branch mechanical properties. In: *Tree Physiology* 26, S. 1549–1558.

- SPELLMANN, H. (2005): Produziert der Waldbau am Markt vorbei? In: *AFZ-Der Wald* 60 (9), S. 454–459.
- SPELLMANN, H.; DIEST, W. VON (1990): Entwicklung von Z-Baum-Kollektiven in langfristig beobachteten Eichen-Versuchsflächen. In: *Forst und Holz* 45 (19), S. 573–580.
- SPELLMANN, H.; DÖBBELER, H.; RUDOLPH, J. (2015): Entwicklung des Nadelholz-Angebotes in Norddeutschland. In: *AFZ-Der Wald* 70 (17), S. 16–19.
- SPELLMANN, H.; WAGNER, S. (1993): Entscheidungshilfen für die Verjüngungsplanung in Fichtenbeständen zum Voranbau der Buche im Harz. In: *Forst und Holz* 48 (17), S. 483–490.
- SPIECKER, H. (2002): Tree rings and forest management in Europe. In: *Dendrochronologia* 20 (1–2), S. 191–202.
- SPIECKER, H. (2007): Zur Steuerung des Dickenwachstums und der Astreinigung wertvoller Trauben- und Stieleichen [*Quercus petraea* (Matt.) Liebl. und *Quercus robur* L.]. In: P. H. DONG (Hg.): Eiche im Pfälzerwald. Mitteilungen aus der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz, 63. Trippstadt, S. 78–95.
- SPRUGEL, D. G.; HINCKLEY, T. M.; SCHAAP, W. (1991): The theory and practice of branch autonomy. In: *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 22, S. 309–334.
- STAATSBETRIEB SACHSENFORST (2008): Ein Jahr nach „Kyrill“ ... und die Folgen – Investitionen im Wald in Millionenhöhe notwendig. Pressemitteilung 03/2008. Graupa. Online verfügbar unter: [http://www.smul.sachsen.de/sbs/download/pm0308\\_Ein\\_Jahr\\_Kyrill.pdf](http://www.smul.sachsen.de/sbs/download/pm0308_Ein_Jahr_Kyrill.pdf), zuletzt geprüft am 30.10.2012.
- STÄHLI, J.; KELLER, S. (2013): Präzise Positionsbestimmung mit Low-Cost-GPS und Postprocessing. Technical Report Nr. 1301. Hochschule für Technik Rapperswil HSR, Rapperswil, Institut für Software.
- STANCIOIU, P. T.; O’HARA, K. L. (2006a): Morphological plasticity of regeneration subject to different levels of canopy cover in mixed-species, multiaged forests of the Romanian Carpathians. In: *Trees* 20 (2), S. 196–209.
- STANCIOIU, P. T.; O’HARA, K. L. (2006b): Regeneration growth in different light environments of mixed species, multiaged, mountainous forests of Romania. In: *European Journal of Forest Research* 125 (2), S. 151–162.
- STORCH, J. K. (2011): Astentwicklung und Astreinigung in Abhängigkeit vom Dickenwachstum bei Buche (*Fagus sylvatica* L.) und Eiche [*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.; *Quercus robur* L.]. Dissertation. Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg i. Br.
- STRUCK, G.; DOHRENBUSCH, A. (2000): Development of a new branchiness index ASIX – A simple tool to describe branchiness in young deciduous forest stands. In: *Annals of Forest Science* 57, S. 811–818.
- TAKENAKA, A. (2000): Shoot growth response to light microenvironment and correlative inhibition in tree seedlings under a forest canopy. In: *Tree Physiology* 20, S. 987–991.
- TEISSIER, E.; THIEBAUT B.; DUVAL, H. (1988): Variability in beech – budding, height growth and tree form. In: *Annals of Forest Science* 45 (4), S. 383–398.
- THIELE, J.; MARKUSSEN, B. (2012): Potential of GLMM in modelling invasive spread. In: *CAB Reviews* 7 (16), S. 1–10.
- THOMASIUS, H. (1990): Vorkommen, Bedeutung und Bewirtschaftung der Fichte in der DDR. In: *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 109, S. 138–151.



- THOMASIIUS, H. (1991): Mögliche Auswirkungen einer Klimaveränderung auf die Wälder in Mitteleuropa. In: *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 110, S. 305–330.
- THOMASIIUS, H. (1994): The influence of mining on woods and forestry in the Saxon Erzgebirge up to the beginning of the 19th century. In: *GeoJournal* 32 (2), S. 103–125.
- THOMASIIUS, H.; GÄRTNER, H. (1988): Auswertung eines Buchenprovenienzversuches von MÜNCH hinsichtlich Wachstum, Qualität und Phänologie. In: S. KORPEL und L. PAULE (Hg.): 3. IUFRO Buchensymposium. Zvolen, S. 31–45.
- THÜRINGENFORST (2012): Revierbuch lang – Auszug aus dem Datenspeicher Wald (DSW2) für die Forstämter Frauenwald, Oberhof und Sonneberg. Unveröffentlichter Datensatz. Gotha.
- THÜRINGENFORST (2014): Auszug der Vollzugsdaten im DSWF und DSW 2 für die Forstämter Oberhof, Frauenwald und Sonneberg. Unveröffentlichter Datensatz. Gotha.
- THÜRINGENFORST (2015a): Bruch- und Wurfholz im Staatswald des Freistaates Thüringen für den Zeitraum 01.10.2006–30.09.2007 für ausgewählte Forstämter und den Gesamtbetrieb – Angaben aus dem Waldschutzmeldedienst der Hauptstelle Waldschutz am Forstlichen Forschungs- und Kompetenzzentrum ThüringenForst-A.ö.R. Unveröffentlichter Datensatz. Gotha.
- THÜRINGENFORST (2015b): Dienstordnung 2.8 – Anweisungen zum Waldbau im Staatswald der Landesforstanstalt (DO Waldbau). Unveröffentlicht. Erfurt.
- THÜRINGER LANDESREGIERUNG (2009): Starkes Thüringen – innovativ, nachhaltig, sozial und weltoffen. Vereinbarung zwischen Christlich Demokratischer Union (CDU), Landesverband Thüringen, und Sozialdemokratischer Partei Deutschlands (SPD), Landesverband Thüringen, über die Bildung einer Koalitionsregierung für die fünfte Legislaturperiode des Thüringer Landtages. Erfurt.
- TIEBEL, K. (2014): Untersuchung der Qualität ausgewählter Buchenvoranbauten (*Fagus sylvatica* L.) unter Berücksichtigung unterschiedlich großer Voranbauflächen unter Fichtenschirm [*Picea abies* (L.) KARST.]. Masterarbeit. TU Dresden, Tharandt, Lehrstuhl für Waldbau und Waldschutz.
- TLWJF (2008): Schadursachen infolge „Kyrill“ – Ergebnisse der Untersuchungen der TLWJF. In: *AFZ-Der Wald* 63 (6), S. 304.
- TLWJF (2011): Standortgerechte Baumarten- und Bestandeszieltypenwahl für die Wälder des Freistaates Thüringen auf Grundlage der forstlichen Standortskartierung unter Beachtung des Klimawandels. Gotha.
- TOGNETTI, R.; JOHNSON, J. D.; MICHELOZZI, M. (1995): The response of European beech (*Fagus sylvatica* L.) seedlings from two Italian populations to drought and recovery. In: *Trees* 9, S. 348–354.
- TOGNETTI, R.; MICHELOZZI, M.; BORGHETTI, M. (1994): Response to light of shade-grown beech seedlings subjected to different watering regimes. In: *Tree Physiology* 14, S. 751–758.
- TOGNETTI, R.; MINOTTA, G.; PINZAUT, S.; MICHELOZZI, M.; BORGHETTI, M. (1998): Acclimation to changing light conditions of long-term shade-grown beech (*Fagus sylvatica*) seedlings of different geographic origins. In: *Trees* 12, S. 326–333.
- UEMURA, A.; ISHIDA, A.; NAKANO, T.; TERASHIMA, I.; TANABE, H.; MATSUMOTO, Y. (2000): Acclimation of leaf characteristics of *Fagus* species to previous-year and current-year solar irradiances. In: *Tree Physiology* 20, S. 945–951.

- UTSCHIG, H. (2000): Wachstum vorherrschender Buchen in Abhängigkeit von Standort und Behandlung. In: *Forst und Holz* 55 (2), S. 44–50.
- VALLADERES, F.; CHICO, J. M.; ARANDA, I.; BALAGUER, L.; DIZENGREMEL, P.; MARINQUE, E.; DREYER, E. (2002): The greater seedling high-light tolerance of *Quercus robur* over *Fagus sylvatica* is linked to greater physiological plasticity. In: *Trees* 16, S. 395–403.
- VALLADERES, F.; NIINEMETS, Ü. (2008): Shade tolerance – A key plant feature of complex nature and consequences. In: *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 39, S. 237–257.
- VAN HEES, A. F. M. (1997): Growth and morphology of pedunculate oak (*Quercus robur* L.) and beech (*Fagus sylvatica* L.) seedlings in relation to shading and drought. In: *Annals of Forest Science* 54, S. 9–18.
- VENABLES, W. N.; RIPLEY, B. D. (2002): Modern applied statistics with S. 4. Auflage. New York: Springer (Statistical and Computing).
- VOßHAGE, J. (2008): Ergebnisse der Untersuchungen der TLWJF zu den Schadursachen infolge des Orkantiefs „Kyrill“. Hg. v. der Thüringer Landesanstalt für Wald, Jagd und Fischerei. Gotha, 13.02.2008. Online verfügbar unter: [http://www.thueringen.de/imperia/md/content/folder/aktuelles/2008\\_02\\_13tlwjf\\_vosshage\\_kyrill.pdf](http://www.thueringen.de/imperia/md/content/folder/aktuelles/2008_02_13tlwjf_vosshage_kyrill.pdf), zuletzt geprüft am 10.12.2012.
- WAGNER, H.-J.; HENKEL, W. (1993): Notwendigkeit und Ziele von Waldumbaumaßnahmen im Wuchsgebiet Thüringer Gebirge und Voraussetzungen für ihre Verwirklichung. In: *Mitteilungen der Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft* 3, S. 37–61.
- WAGNER, S. (1999): Ökologische Untersuchungen zur Initialphase der Naturverjüngung in Eschen-Buchen-Mischbeständen. Schriften aus der Forstlichen Fakultät der Universität Göttingen und der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt, 129. Frankfurt a. M.: J. D. Sauerländer's.
- WAGNER, S. (2004): Klimawandel – Einige Überlegungen zu waldbaulichen Strategien. In: *Forst und Holz* 59 (8), S. 394–398.
- WAGNER, S. (2007): Rationaler Waldbau – Fragen und Anregungen. In: *Forst und Holz* 62 (8), S. 12–17.
- WAGNER, S. (2008): Klimawandel – Überlegungen zu waldbaulichen Strategien. In: *AFZ-Der Wald* 63 (20), S. 1104–1107.
- WAGNER, S.; COLLET, C.; MADSEN, P.; NAKASHIZUKA, T.; NYLAND, R.; SAGHEB-TALEBI, K. (2010): Beech regeneration research – From ecological to silvicultural aspects. In: *Forest Ecology and Management* 259, S. 2172–2182.
- WAGNER, S.; MÜLLER-USING, B. (1997): Ergebnisse der Buchen-Voranbauversuche im Harz unter besonderer Berücksichtigung der lichtökologischen Verhältnisse. In: LÖBF (Hg.): Waldbau von Nadelholzreinbeständen in Mischbestände. LÖBF-Schriftenreihe, 13. Recklinghausen, S. 17–30.
- WAGNER, S.; RÖKER, B. (2000): Birkenanflug in Stieleichenbeständen – Untersuchungen zur Dynamik der Konkurrenz über 5 Vegetationsperioden. In: *Forst und Holz* 55 (1), S. 18–22.
- WEBER, G.-E. (2014): Zu „Dauerwaldartige Fichtenbestände?“ und „Risiko der Fichtenwirtschaft“. In: *AFZ-Der Wald* 69 (8), S. 18–19.
- WEIDIG, J.; ARENHÖVEL, W.; EISENHAUER, D.-R.; WAGNER, S. (2015): Buchen-Voranbau trotz instabilem Fichtenschirm. In: *AFZ-Der Wald* 70 (5), S. 41–42.

- WEIDIG, J.; WAGNER, S.; HUTH, F. (2014): Qualitätsentwicklung von Buchenvoranbauten (*Fagus sylvatica* L.) im Thüringer Wald nach unplanmäßigem sturmbedingtem Verlust des Fichtenschirms. In: *Forstarchiv* 85 (4), S. 122–133.
- WEIHS, U.; KLAENE, K. (2000): Wuchsdynamik und Qualität von Buchenvoranbauten unter Fichtenaltholz auf Basaltstandorten im hessischen Forstamt Kassel. In: *Forst und Holz* 55 (6), S. 177–181.
- WEISER, C. (2012): Genauigkeit der Aussagen des Waldinformationssystems Sachsen (WIS) hinsichtlich der Lage von Verjüngungsflächen in einem Bestand. Tharandt, 21.11.2012. E-Mail an J. Weidig.
- WEISKITTEL, A. R.; MAGUIRE, D. A.; MONSERUD, R. A. (2007): Response of branch growth and mortality to silviculture treatments in coastal Douglas-fir plantations – Implications for predicting tree growth. In: *Forest Ecology and Management* 251, S. 182–194.
- WELANDER, N. T.; OTTOSSON, B. (1997): Influence of photosynthetic photon flux density on growth and transpiration in seedlings of *Fagus sylvatica*. In: *Tree Physiology* 17, S. 133–140.
- WHITTINGHAM, M. J.; STEPHENS, P. A.; BRADBURY, R. B.; FRECKLETON, R. P. (2006): Why do we still use stepwise modelling in ecology and behaviour? In: *Journal of Animal Ecology* 75, S. 1182–1189.
- WILHELM, G. J.; LETTER, H.-A.; EDER, W. (1999a): Die Phase der Dimensionierung – Konzeption einer naturnahen Erzeugung von starkem Wertholz. In: *AFZ-Der Wald* 54 (5), S. 236–238.
- WILHELM, G. J.; LETTER, H.-A.; EDER, W. (1999b): Die Phase der Qualifizierung – Konzeption einer naturnahen Erzeugung von starkem Wertholz. In: *AFZ-Der Wald* 54 (5), S. 234–236.
- WILHELM, G. J.; LETTER, H.-A.; EDER, W. (1999c): Zielsetzungen und waldbauliche Prinzipien – Konzeption einer naturnahen Erzeugung von starkem Wertholz. In: *AFZ-Der Wald* 54 (5), S. 232–233.
- WILHELM, G. J.; RIEGER, H. (2013): Naturnahe Waldwirtschaft mit der QD-Strategie. Stuttgart: Eugen Ulmer.
- WOHLLEBEN, F. (1990): Waldbauliche Konsequenzen für den Thüringer Wald. In: *AFZ-Der Wald* 55 (33–34), S. 858–859.
- WOLFF, B.; HÖLZER, W.; FRÖMDLING, D.; BONK, S. (1998): Datenaufbereitung für Modellrechnungen aus der Bundeswaldinventur (BWI) und dem Datenspeicher Waldfonds (DSW). Arbeitsbericht des Instituts für Forstökonomie und Walderfassung 98/3. Hg. v. der Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft. Eberswalde. Online verfügbar unter: [http://literatur.vti.bund.de/digbib\\_extern/dk040182.pdf](http://literatur.vti.bund.de/digbib_extern/dk040182.pdf), zuletzt geprüft am 12.12.2012.
- WOLF, H. (2008): Rot-Buche – Plastizität im Klimawandel. Praxisforschung in Sachsen. In: *AFZ-Der Wald* 63 (20), S. 1096–1099.
- WOLF, H. (2011): Austrieb und Trockentoleranz von Rotbuchen-Herkünften (*Fagus Sylvatica* L.) unter sich ändernden Klimabedingungen. In: W. D. MAURER und B. HAASE (Hg.): Holzproduktion auf forstgenetischer Grundlage im Hinblick auf Klimawandel und Rohstoffverknappung. 28. Internationale Tagung der Arbeitsgemeinschaft (ARGE) für Forstgenetik und Forstpflanzenzüchtung. Treis-Karden, 2009. Mitteilungen aus der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz, 69/11. Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Ernährung, Weinbau und Forsten. Trippstadt, S. 64–78.

- WOLF, H. (2015): Herkunftsverwendung bei der Rotbuche im Landeswald Sachsens seit 1990. Tharandt, 25.03.2015. E-Mail an J. Weidig.
- WU, H.; SHARPE, P. J. H.; WALKER, J.; PENDRIDGE, L. K. (1985): Ecological field theory – A spatial analysis of resource interference among plants. In: *Ecological Modelling* 29, S. 215–243.
- ZEIBIG, A.; DIACI J.; WAGNER S. (2005): Gap disturbance patterns of a *Fagus sylvatica* virgin forest remnant in the mountain vegetation belt of Slovenia. In: *Forest Snow and Landscape Research* 79, S. 69–80.
- ZIMMERMANN, T. (1997): GPS im Forstbereich – Stand der derzeitigen Untersuchungen. Diplomarbeit. LMU München, Lehrstuhl für Forstliche Arbeitswissenschaften und Angewandte Informatik.
- ZUUR, A. F.; IENO, E. N.; WALKER, N. J.; SABELIEV, A. A.; SMITH, G. M. (2009): Mixed effects models and extensions in ecology with R. New York: Springer.

## Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe; die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken wurden als solche kenntlich gemacht. Bei der Auswahl und Auswertung des Materials sowie bei der Herstellung des Manuskripts habe ich Unterstützungsleistungen von folgenden Personen erhalten: - *keine* -.

Weitere Personen waren an der geistigen Herstellung der vorliegenden Arbeit nicht beteiligt. Insbesondere habe ich nicht die Hilfe eines kommerziellen Promotionsberaters in Anspruch genommen. Dritte haben von mir weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen.

Die Arbeit wurde bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und wurde auch noch nicht veröffentlicht.

Ich bestätige, dass ich die Promotionsordnung der Fakultät Umweltwissenschaften der Technischen Universität Dresden anerkenne.

.....

Ort, Datum

.....

Unterschrift